Zu diesem Handbuch

Das Handbuch gliedert sich in 10 Abschnitte, die nicht aufeinander aufbauen und daher nicht unbedingt alle durchzuarbeiten sind. Die Kapitel „Hardware Setup“ und „Software Setup“ führen durch die Installation des Meßsystems auf dem PC. Im folgenden Absatz „Die Menüs von MF" werden alle Menüpunkte tabellarisch abgehandelt und kurz erläutert. Dieser Absatz dient daher vornehmlich als Nachschlagewerk. Die Kapitel „Vorbereitungen für eine Messung“ und „Messungen an Lautsprechern“ geben allgemeine Erläuterungen zu den hier eingesetzten Meßverfahren und der zugehörigen Hardware-Peripherie. Für den schnellen Einstieg finden sich unter „Beispiele“ die in der Audiotechnik häufig vorkommenden Meßabläufe mit genauen Erläuterungen und Setups. Für den ersten Kontakt mit MF und der zugehörigen Hardware empfiehlt es sich, zunächst Standardmessungen an Hand der Beispiele anzuwenden und diese anschließend bei Bedarf nach eigenen Wünschen zu modifizieren. Die beiden letzten Kapitel „Option Crossover Works“ und „Hugo“ befassen sich mit dem optionalen Modul zur Berechnung von FIR-Filtern und dem Digitalcontroller Hugo bzw. DSC28 von GAE. Ein weiteres Kapitel zum Digital Field Controll (DSC) von HK-Audio befindet sich in der Vorbereitung.

Hinweise im Text werden in folgender Form gekennzeichnet:

Menüpunkte in MF:	*`AD/DA basic settings...`*
Tips:	Portadresse der Karte ist $0530...
Warnungen und wichtige Hinweise:	**Vorsicht, das Kabel wegen der....**
Tasten:	über die Tastenkombination `CTRL M` ....
Optionen und Funktionen:	*Averaging...* (A=Hotkey)

Bedeutung der Symbole:

Symbol	Bedeutung
💻	Nur für Servicezwecke ; nicht verstellen
👓	Nur zum Ablesen ; keine Eingabe vorgesehen
✋	Vorsicht, eine Veränderung der Einstellung sollte nur bei hinreichender Kenntnis der Hardware und Signalverarbeitung erfolgen
💣	Wichtiger Parameter, der für den Betrieb mit der gegebenen Standardhardware keinesfalls verändert werden darf
☠	Gefährliches Menü, noch nicht ganz fertig oder hinreichend geprüft
⌨	Eingabe erforderlich

CE-Konformität

Für das mit CE-Zeichen gekennzeichnete vorliegende Erzeugnis ITADDA16-Dual 16Bit AD/DA Measuring System wird hiermit bestätigt, daß es den Schutzanforderungen entspricht, die in der Richtlinie 89/336/EWG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit festgelegt sind; außerdem entspricht es den Vorschriften des Gesetzes über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG) vom 30. August 1995.

Zur Beurteilung des Erzeugnisses hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit wurden folgende einschlägige harmonisierte Normen herangezogen:

DIN EN 55011; DIN EN 55013; DIN EN 55014; DIN EN 55022; DIN EN 60555; DIN EN 50081-1/2

Die zugrundeliegende Erklärung und Konformitätsbescheinigung kann beim Hersteller eingesehen werden. Verantwortlich als Hersteller ist:

Audio & Acoustics Consulting Aachen
Dr.-Ing. Swen Müller (MF und MFX) und Dr.-Ing. Anselm Goertz (MAXILS)
Robensstr. 62
D-52070 Aachen (Germany)
Tel. ++49 241 155820 ; Fax ++49 241 155821 ; e-mail anselm.goertz@t-online.de

Hinweis! Die Kennzeichnung mit dem CE-Zeichen bestätigt die Einhaltung der gesetzlichen Auflagen für den Vertrieb und die Herstellung von elektrischen und elektronischen Geräten. Das CE-Zeichen ist daher kein Güte-Siegel, sondern ausschließlich Nachweis für eine ordnungsgemäße elektromagnetische Verträglichkeit nach o.g. Prüfvorschriften.

Haftungs- und Garantiebedingungen

Haftungserklärung. Für Schäden an Lautsprechern, Verstärkern oder anderen Geräten, die durch den Betrieb des ITADDA beschädigt werden, übernimmt die Audio & Acoustics Consulting keine Haftung. Dies gilt für die ordnungsgemäße, wie auch die unsachgemäße oder fahrlässige Inbetriebnahme und/oder Installation des ITADDA. Schadensersatzansprüche auch Dritter, die aus Forderungen aufgrund vermeintlich eingeschränkter oder ausbleibender Funktion des ITADDA herrühren (z.B. nicht stattfindende Veranstaltungen, der Defekt eines PCs, usw.) sind ausdrücklich ausgeschlossen.

Produktgarantie. Über den Rahmen der gesetzlichen Gewährleistung hinaus übernimmt die Audio & Acoustics Consulting für das ITADDA die Garantie der einwandfreien Herstellung und Mängelfreiheit für die Dauer von 24 Monaten nach Verkaufsdatum. Als Nachweis für den Beginn der Garantiezeit gilt das Datum einer ausgestellten Rechnung. Als Hersteller ersetzt die Audio & Acoustics Consulting innerhalb der Garantiezeit defekte Teile und setzt nicht funktionierende Baugruppen in Stand, wenn der Defekt unter normalen Betriebsumständen aufgetreten ist. Die Beurteilung eines Garantieanspruchs wird nach unserer Untersuchung anerkannt, sofern das Gerät frachtfrei und in der Originalverpackung zugesandt wurde. Von Gewährleistung und Garantie ausgeschlossen sind Fehler, die durch unsachgemäße elektrische oder mechanische Handhabung, Transportschäden oder Unfälle entstanden sind. Der Anspruch auf Garantie oder Gewährleistung erlischt weiterhin nach jeder Form von Reparaturversuchen oder nach Entfernen der Seriennummer am Gerät.

Warnung. Meßgeräte und Meßaufbauten entsprechen Laborbedingungen und sind mit äußerster Sorgfalt zu handhaben. Der Anschluß und die Bedienung dieser Geräte verlangt auf jeden Fall ausgiebige Fachkenntnisse im Umgang mit Audiogeräten und elektrischer Meßtechnik. Meßgeräte, Audiogeräte und Lautsprecher können bei falscher Handhabung zu schwerwiegenden materiellen und körperlichen Schäden führen. Auf eine ordnungsgemäße Erdung des Meßaufbaues ist stets mit äußerster Sorgfalt zu achten. An nicht geerdeten Stromnetzen darf das Meßsystem nicht betrieben werden.

Verpackungsinhalt

Die Standardverkaufsverpackung des ITADDA enthält

- 1 Stück ITADDA 16 Bit 2 Channel ISA PC Karte
- 1 Stück ITADDA Frontend mit Vorverstärker und Endstufen
- 1 Verbindungskabel Sub D 15 polig vom Frontend zur PC Karte
- Prüfprotokoll
- Diskette mit DOS Software
- Bedienungsanleitung

Software

Herausgeber der MF, MFX und MAXILS Software ist:

Audio & Acoustics Consulting Aachen
Dr.-Ing. Swen Müller (MF und MFX) und Dr.-Ing. Anselm Goertz (MAXILS)
Robensstr. 62
D-52070 Aachen (Germany)
Tel. ++49 241 155820 ; Fax ++49 241 155821 ; e-mail anselm.goertz@t-online.de

Copyright

Herausgeber dieser Anleitung in Deutsch oder Englisch ist:

Audio & Acoustics Consulting Aachen
Dr.-Ing. Anselm Goertz
Robensstr. 62
D-52070 Aachen (Germany)

Hotline

Eine Hotline für Softwareprobleme und Hardwarefragen steht jederzeit bereit. Anfragen per e-mail sind erwünscht, in dringenden Fällen wird auch gerne telephonische Auskunft gegeben.

Audio & Acoustics Consulting Aachen
Dr.-Ing. Anselm Goertz
Robensstr. 62
D-52070 Aachen (Germany)
Tel. ++49 241 155820 ; Fax ++49 241 155821 ; e-mail anselm.goertz@t-online.de

Serviceleistungen

Als weitere kostenpflichtige Serviceleistungen stehen zu Verfügung:

- Einrichtung von Meßplätzen und Meßräumen
- Schulungen in Audio und Akustik Meßtechnik
- Messungen vor Ort und im reflexionsarmen Raum in Aachen
- Messungen von Endstufen, Mischpulten, etc. mit Rohde & Schwarz UPD
- Planung , Berechnung und Simulation von Beschallungsanlagen
- Inbetriebnahme von stationären und mobilen PA-Systemen
- Einmessen von Controllern auf Lautsprechersysteme
- Erstellung von Lautsprecherdateien für die Simulationsprogramme EASE, CADP2 und ULYSSES

1 Hardware Setup

1.1 Allgemeines

Die ITADDA16 Karte kann in allen PCs mit 16-bit ISA Slot eingesetzt werden. Das Board muß mindestens über einen 386 Prozessor mit 387 Coprozessor verfügen. Besser ist natürlich ein 486DX oder Pentium Typ. 486SX Modelle ohne Coprozessor können nicht verwendet werden. An die Größe des RAM Speichers werden keine besonderen Ansprüche gestellt. Der gesamte Speicher kann im 32-Bit Modus linear adressiert werden, so daß die Auflösung und Länge der zu messenden Signale natürlich vom dem zur Verfügung stehenden Speicher abhängen. Für den normalen Betrieb empfehlen sich 8 MB oder mehr. Auf der Festplatte werden nur 4 MB für alle zum Meßprogramm gehörenden Dateien benötigt. Das externe ITADDA16 Frontend wird über ein 25-poliges Kabel mit Sub-D Anschlüssen mit der AD/DA-Umsetzer Karte im PC verbunden. **Vorsicht, das Kabel wegen der Kurzschlußgefahr nicht bei eingeschalteten Geräten stecken**. Das Frontend benötigt einen eigenen Netzanschluß für ein internes Netzteil. Nur der Digitalteil der Schaltungen im Frontend wird über das PC Netzteil versorgt. Die Standardeinstellung für die Portadresse der Karte ist $0530 und kann bei Bedarf auf der Karte umgeschaltet werden. Die Adresse muß in der Software unter *`AD/DA basic settings`* eingetragen werden. Wird die Karte dann korrekt detektiert, erscheint ein Häkchen hinter der Adresse. Soweit eine kurze Einführung für die erste Inbetriebnahme des Meßsystems. Weitere Details erscheinen in den folgenden Absätzen.

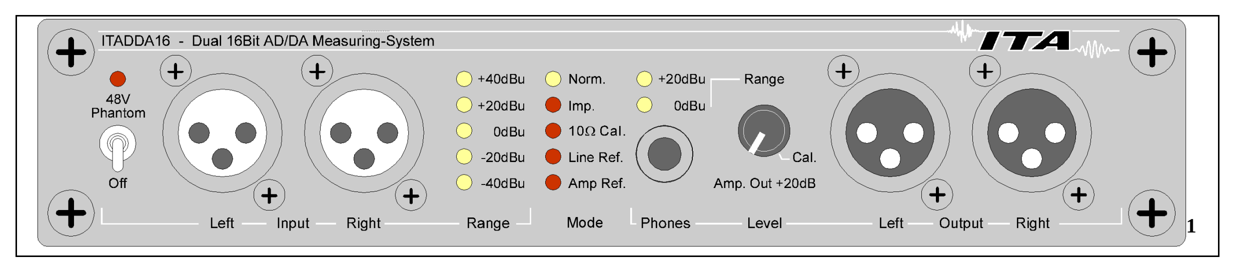


Abbildung 1 Frontansicht des ITADDA Frontend

1.2 Analoge Ein-/Ausgänge

Das gesamte Meßsystem arbeitet komplett 2-kanalig. Folglich sind alle Ein- und Ausgänge doppelt vorhanden und mit Left bzw. Right beschriftet. Auf der Frontseite befinden sich die symmetrischen Ausgänge und Eingänge mit XLR Anschlüssen. Die unsymmetrischen Leistungsausgänge für den direkten Anschluß von Lautsprechern an die internen 20 Watt Meßverstärker befinden sich als Bananenbuchse auf der Rückwand neben dem Kühlkörper.

1.2.1 Eingänge

Die Eingänge sind elektronisch symmetriert und können schaltbar mit einer Phantomspannung von 48 V für Mikrophone versorgt werden. Der maximale Eingangspegel hängt von der intern geschalteten Verstärkung ab und kann auf der rechts neben den XLR-Buchsen befindlichen LED-Kette abgelesen werden. Die Verstärkung kann nur vom PC aus geschaltet werden und ist in 20 dB Abstufungen möglich, so daß der maximale Eingangspegel zu -40, -20, 0, +20 und +40 dBu (Bezug 0 dBu = 775 mV_{eff}) eingestellt werden kann. Bei unsymmetrischer Beschaltung ist PIN 3 der Eingangsbuchse auf Masse (PIN 1) zu legen. Eine genauere Anpassung der Eingangsempfindlichkeit erlaubt die in 1,5 dB Stufen programmierbare Verstärkung der Eingänge des AD-Umsetzers. Auch diese Einstellung erfolgt im Meßprogramm unter *AD/DA basic settings*. Abhängig vom erwarteten Eingangssignal sollte die Eingangsempfindlichkeit annähernd angepaßt werden.

1.2.2 Ausgänge

Die XLR Ausgänge auf der rechten Frontplattenhälfte sind elektronisch symmetriert und können je nach interner Einstellung maximale Pegel von 0 oder +20 dBu (siehe LEDs auf der Frontplatte) liefern. Die Einstellung erfolgt auch hier adäquat zu den Eingängen im Menü *AD/DA basic settings*. Wird ein unsymmetrisches Ausgangssignal benötigt, ist dieses mittels Adapter von XLR auf Chinch o.ä. so abzugreifen, daß PIN 3 der Ausgangsbuchse mit Masse PIN 1 verbunden wird. Der Ausgangspegel an PIN 2 steigt automatisch um 6 dB und die Ausgangsspannung an PIN 2 gegen Masse entspricht der sonst zwischen PIN 2 und PIN 3 anliegenden Differenzspannung.

1.2.3 Meßendstufen

Die internen Meßverstärker sind kleine 20 Watt Endstufen mit einer maximalen Verstärkung von 20 dB. Die Verstärkung kann über das Poti an der Frontplatte eingestellt

werden und sollte für Meßzwecke auf Rechtsanschlag (Cal.) stehen, so daß die definierte Verstärkung von 20 dB eingestellt ist. Grundsätzlich widerspricht das Poti der Philosophie des Meßsystems, daß alle Einstellungen nur von der Software aus vorgenommen werden können und so keine Fehlbedienungen möglich sind. Der Kompromiß mit Poti und Cal.-Stellung wurde hier gemacht, um bei der Verwendung der Endstufe als Mithörverstärker über Lautsprecher oder Kopfhörer bei Messungen den Abhörpegel einstellen zu können. Das Ausgangssignal liegt an den Bananenbuchsen in der Rückwand und an der 6,3 mm Kopfhörerbuchse in der Frontplatte an. **Achtung: Die maximale Ausgangsspannung der Endstufen an einer Last von 4 Ohm oder größer liegt bei knapp über 20 dBu (ca. 8 V_{eff}),** so daß bei allen Messungen mit Endstufe der Ausgangspegel im Meßsystem nicht höher als 0 dBu eingestellt werden darf, um sicher zu stellen, daß keine Übersteuerungen auftreten. Bei Frequenzgangmessungen mit Maximalfolgenrauschen machen sich Übersteuerungen durch einen buschigen Kurvenverlauf bemerkbar und sollten unbedingt vermieden werden.

1.2.4 AD/DA-Umsetzer

AD- und DA-Umsetzer des Meßsystems befinden sich auf der PC-Steckkarte im Crystal CS4231 Baustein. Der Chip beinhaltet zwei 16-bit AD-Umsetzer und zwei 16-bit DA-Umsetzer, die eine Abtastrate zwischen 5,5 kHz und 48 kHz ermöglichen. Der Störabstand liegt minimal bei 75 dB und typisch bei 85 dB, womit Lautsprecher und Mikrophonmessungen sowie alle Arten vom raumakustischen Messungen ohne Probleme möglich sind. Die Verzerrungswerte erreichen min. -80 dB THD und typisch -90 dB THD. Klirrfaktormessungen an Lautsprechern und einfache Überprüfungen des Klirrverhaltens anderer Audiokomponenten wie Endstufen u.ä. erfordern keine besseren Werte. Messungen in Bereichen unter -80 dB Klirr (= 0.01%) sollten vorher durch eine Leermessung auf Plausibilität geprüft werden. Grundsätzlich gilt, daß bei gelegentlich auftretenden Zweifeln an der Richtigkeit einer Messung, durch eine Leermessung Klarheit geschaffen werden kann, welche Stör- bzw. Verzerrungsanteile vom Meßsystem und welche vom Meßobjekt stammen. Das Meßobjekt wird zu diesem Zweck einfach überbrückt und die Messung mit unveränderten Einstellungen wiederholt.

2 Software Setup

2.1 Allgemeines

Die Startdateien des Rechners AUTOEXEC.BAT und CONFIG.SYS sind ein wenig zu modifizieren, bevor es losgehen kann. **In der CONFIG.SYS ist der EMM Treiber völlig zu deaktivieren**. Praktische ist hier die Eintragung DEVICE?=C:\DOS\EMM386.EXE, so daß beim Start des PCs abgefragt wird, ob der Treiber geladen werden soll oder nicht. Diese ist dann mit N=nein zu beantworten. In der AUTOEXEC.BAT ist nichts weiter zu tun, als in der PATH Anweisung den Pfad einzutragen, wo die Meßprogramme installiert sind. z.B.:
PATH C:\DOS;C:\WINDOWS;C:\MESS

Der freie DOS Speicher sollte mindestens 450K für MF und 500K für MFX betragen. Kommt beim Aufruf des Messprogrammes MF bzw. MFX die Fehlermeldung „Oh Lord, more memory please“, kann der vorhandene Speicher mit dem DOS Befehl MEM /c /p abgefragt werden. Man erhält so auch direkt einen Überblick, welche Programme den Speicher belegen. Die beiden Programme MF und MFX unterscheiden sich nur durch die zusätzlichen Option für FIR-Filter Berechnungen im MFX. MF ist daher natürlich weniger umfangreich und erreicht weniger schnell das Speicherlimit im unteren 640 kByte DOS Bereich.

Nach diesen Vorbereitungen kann der Pfad MESS angelegt und die Dateien MESS-SYS.ZIP und PKUNZIP.EXE von der Diskette hierhin kopiert werden. Der anschließende Aufruf PKUNZIP MESS-SYS.ZIP entpackt alle notwendigen Dateien in diesem Verzeichnis. Werden bei der späteren Anwendung der Messprogramme gewichtete Rauschfolgen oder bestimmte Zeichensätze benötigt, so ist dieser Pfad anzugeben.

2.2 AD/DA Umsetzer

Alle wichtigen Einstellungen zur Meßhardware finden sich im Menü `AD/DA basic settings`. Als erste Grundeinstellung ist hier die Hardware Auswahl vorzunehmen. Das hier beschriebene System wird als ITADDA-16 bezeichnet. Entsprechend der Hardware wird in allen weiteren Menüpunkten jetzt eine Standardeinstellung vorgegeben, die für den normalen Betrieb geeignet ist. Absolut wichtig ist die Auswahl des richtigen Eingangs auf am AD/DA-Umsetzer, da nur der `Input line` von der Hardware unterstützt wird. Nach dem ersten Setup sollte auch die Portadresse geprüft werden. MF sucht die Karte an der Standardadresse **$0530**, die auch auf der PC Steckkarte eingestellt ist. Wird wegen eines Adresskonfliktes mit anderen Karten im PC die Hardwareadresse der Karte per Jumper geändert, so kann mit ? im Menupunkt `Port address` ein automatisches Absuchen der möglichen Adressen gestartet werden. Ist die Suche erfolgreich, so erscheint ein Häkchen hinter der Adresse.

Die Menüpunkte `AD voltage range` und `DA voltage range` stellen die Skalierung der Messungen bezüglich der Eingangsempfindlichkeit und der Ausgangsspannung der Hardware ein. Hier ist nur einmalig der Wert für Vollaussteuerung bei geringster Verstärkung bzw. die maximale Ausgangsspannung einzugeben. Alle weiteren Anpassungen der Eingangs- und Ausgangsempfindlichkeiten geschehen unter `AD fullscale bzw. DA fullscale` im unteren Drittel dieses Fensters. Für die hier verwendete Hardware ist die höchst mögliche **Eingangsspannung 109,54 V Spitzenwert**, das entspricht +40 dBu. Die maximale **Ausgangsspannung** beträgt **10,954 V** Spitzenwert, das entspricht +20 dBu.

Der hier eingesetzte Crystal CS4231 AD/DA-Umsetzer erlaubt Abtastraten zwischen 5,5 kHz und 48 kHz. Alle notwendigen Anti-Aliasing Tiefpaßfilter befinden sich für AD- und DA-Umsetzer auf dem Baustein und passen sich automatisch in ihrer Eckfrequenz der Abtastrate an. Zur Erinnerung: Es dürfen keine Signalanteil oberhalb der halben Abtastrate am Eingang des AD-Umsetzers anliegen. Ansonsten kommt es zu Meßfehlern. Die Standard Abtastraten sind 44,1 kHz (CD-Player) oder auch 48 kHz (DAT-Recorder). Unter Berücksichtigung des Sperrbereiches der Filter bleibt bei 44,1 kHz eine obere Frequenzgrenze von ca. 20 kHz und bei 48 kHz von ca. 22 kHz. Die Auswahl der Abtastfrequenz erfolgt im Menupunkt `AD sample rate`. Eingestellt wird immer der nächst mögliche Wert, der seitens der Taktteiler auf der Hardware möglich ist.

Die Anzahl der `DA bits` ist für den Crystal CS4231 auf 16 Bit festgelegt und nicht einstellbar. Gleiches gilt für die `Clock & Trigger` Einstellungen, die von dieser Hardware für externe Signale nicht unterstützt werden.

Das untere Drittel des `AD/DA basic settings` Fensters enthält sehr wichtige Einstellungen und bedarf einer besonderen Beachtung. Unter `AD inputs` wird der Eingangskanal links/rechts oder der zweikanalige Betrieb ausgewählt. Ausgangsseitig arbeiten immer beide DA Kanäle. Mit der Einstellung `DA inv. R channel` kann das Ausgangssignal des rechten Kanales invertiert werden, z.B. um eine Endstufe im Brückenbetrieb anzusteuern. Die Einstellmöglichkeiten `AD bzw. DA fullscale` bestimmen die maximale Eingangs- bzw. Ausgangsspannung an den symmetrischen Ein- und Ausgängen des Frontends. Für Messungen mit der eingebauten Endstufe ist dringend zu beachten, daß die zusätzlichen 20 dB Verstärkung nicht zur Übersteuerung des Verstärkers führen. Eine **Einstellung DA fullscale von 0 dBu** schützt sicher vor zu großen Eingangssignale für die eingebauten Endstufen, deren Clipgrenze bei knapp über 20 dBu liegt. Alle Werte werden in dBu und in Volt Spitzenwert angegeben.

Die Qualität aller Messungen hängt stark vom richtig gewählten Aussteuerungsbereich der AD-Umsetzer ab. Eine Kontrolle über die Aussteuerung ist über den kleinen Balken rechts unter den Diagrammen während der Messung möglich. Die Einteilung ist in 10 dB Stufen. Im Falle einer Übersteuerung verfärbt sich der weiße Balken rosa. Die Einstellung des Wertes für die Vollausteuerung der Eingänge erfolgt unter `AD fullscale` und sollte nach einer gewissen Abschätzung des Eingangspegels mit einigen dB Sicherheit erfolgen. Alternativ dazu kann die *Auto Range* Funktion aktiviert werden, die in wenigen Iterationsschritten die Eingangsempfindlichkeit bei der Referenzmessung und im normalen Meßbetrieb optimal einstellt. Ein zu hoher Pegel an den AD-Eingängen macht sich durch Verzerrungen und störende Spitzen in der Impulsantwort sowie einen buschiges Aussehen der Frequenzgänge bemerkbar. (siehe Abbildung 2). Bei zu geringem Pegel und unzureichendem Störabstand können die Frequenzgänge breitbandig oder auch nur bei bestimmten Frequenzen, z.B. durch Netzbrummen, gestört sein (siehe Abbildung 3). **Achtung: Bei eingeschalteter Glättung** können solche Störungen leicht vertuscht und daher nicht entdeckt werden. Erst bei der weiteren Auswertung treten dann plötzlich nicht mehr zu korrigierende Fehler auf. Bei der Messung sollte die Glättung daher im Normalfall zunächst ausgeschaltet sein. Grundsätzlich empfiehlt es sich, alle Messungen zunächst ohne Glättung und weitere Verarbeitung abzuspeichern. So steht auch bei späteren Weiterverarbeitungen immer die vollständige Information zur Verfügung.

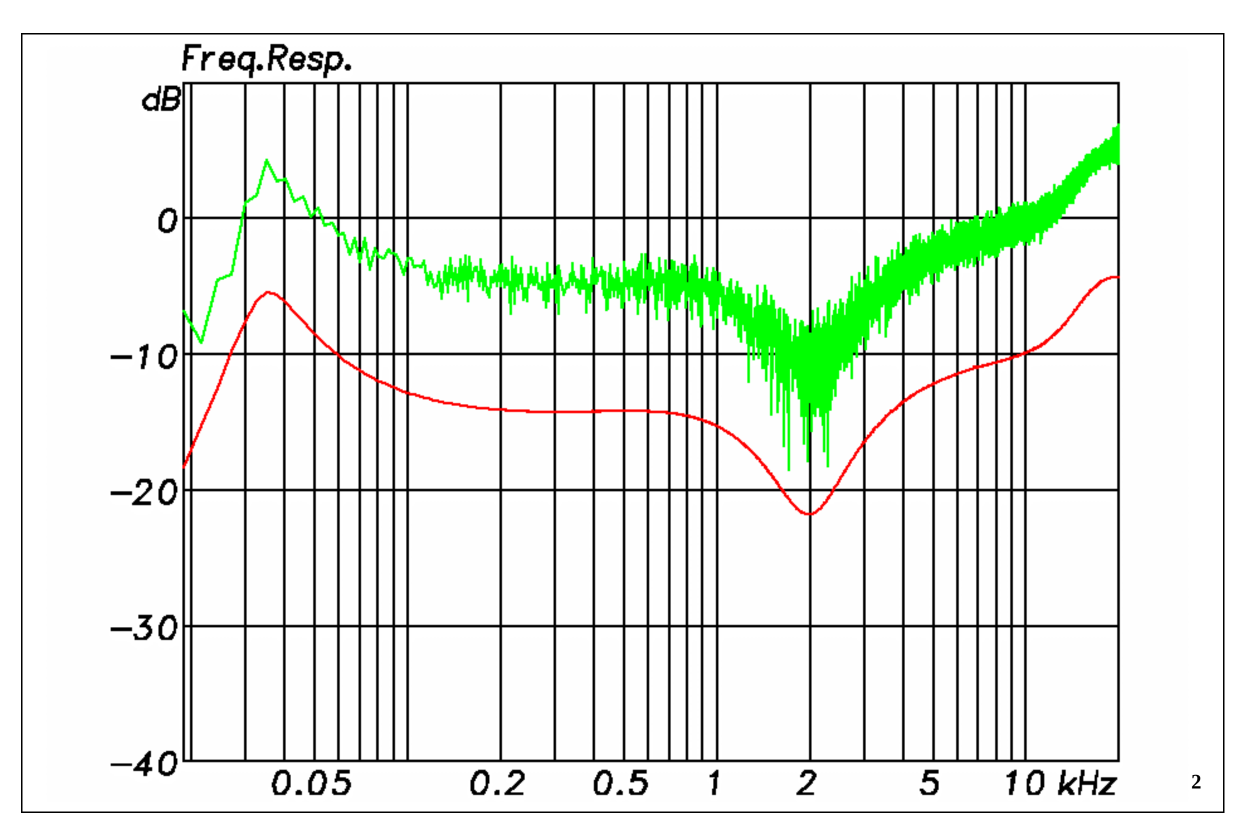


Abbildung 2 **Frequenzgangmessung bei richtiger Aussteuerung (unten) und bei zu hohem (oben) Pegel**

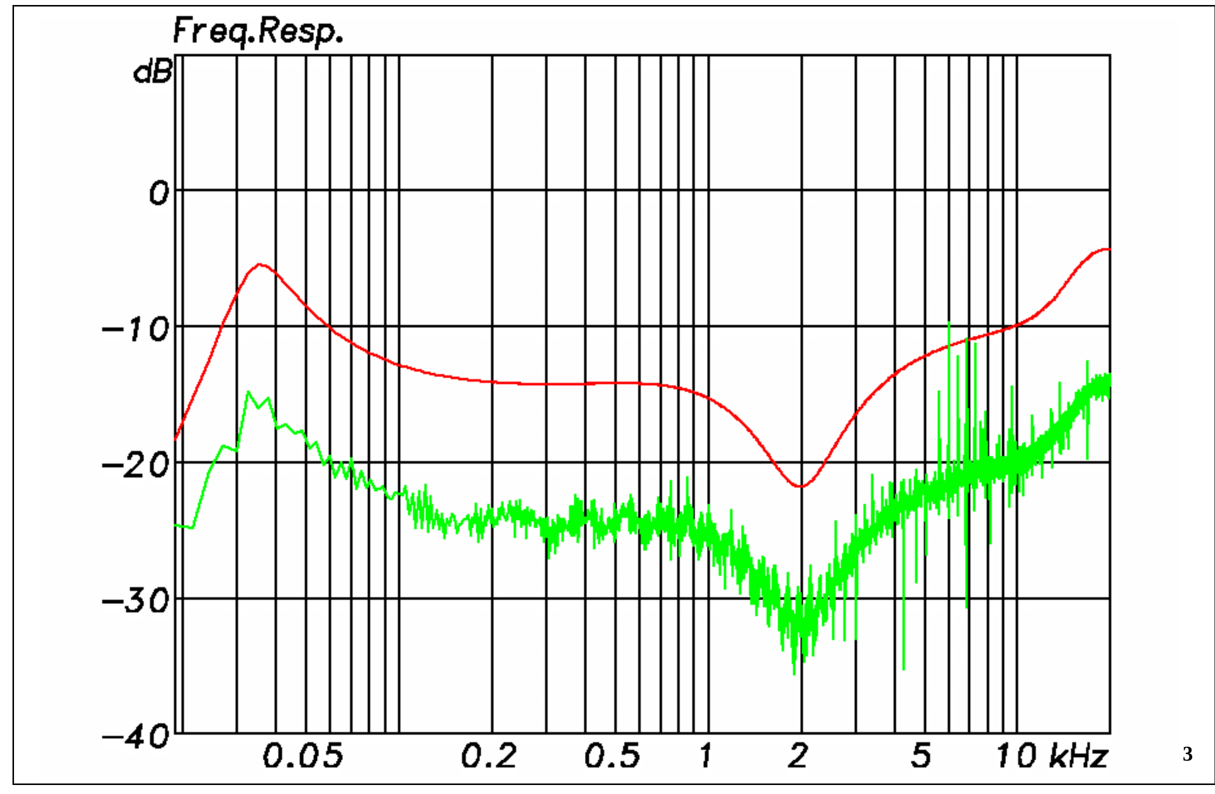


Abbildung 3 **Frequenzgangmessung bei deutlich zu geringer (unten) Aussteuerung**

2.3 Prozessor und Speicher

Im Menü `Utility Processor/Memory` kann der erkannte Prozessortyp und die Speicherverteilung für MF abgelesen werden. MF arbeitet mit allen Prozessoren vom 386 an aufwärts. Bei **386 und 486SX Typen muß ein Coprozessor** vorhanden sein. Dank der optimierten Assembler Routinen in den zeitkritischen Bereichen des Programms liefert MF auch schon auf 486/33 Prozessoren sehr kurze Verarbeitungszeiten auch für komplexere Signalbearbeitungen, wie sie z.B. im Crossover Modul auftreten.

Der untere Balken in Processor/Memory Fenster stellt den gesamten RAM Speicher des Rechners dar. Der weiß gekennzeichnete Bereich ist der vom Programm bzw. von Datenfeldern des Programms belegte Speicher. Für eine vollständige Ausnutzung der Rechner Ressourcen darf kein EMM Treiber von DOS oder Windows geladen sein.

2.4 Grafik und Drucker

MF unterstützt zwei grundsätzliche Möglichkeiten, Messdiagramme auszudrucken oder in andere Dokumente einzubinden. Direkt aus dem Programm können HP Laser Jet und HP Desk Jet Drucker, die über eigenen Speicher und einen HPGL Interpreter verfügen, angesprochen werden. Neuere Windows-Drucker z.B. HP Desk Jet 870 unterstützen diese Betriebsart leider nicht mehr. Völlig problemlos sind die HP Laser Drucker. Wer noch Plotter sein eigen nennt oder Zugriff auf ein Computermuseum hat, kann auch direkt einen HP kompatiblen Plotter ansprechen und schöne bunte Grafiken aufs Papier malen.

Zur Weiterverarbeitung mit anderen Programmen bietet sich die einfache Möglichkeit eine kompakte HPGL-Datei zu erzeugen und diese dann über einen Grafikkonverter einzubinden. Word 6.0 oder Corel Draw bieten diese Möglichkeiten. Besteht nicht die Möglichkeit ein HPGL-File einzulesen, so kann der kleine Umweg über ein im Druckgewerbe sehr weit verbreitetes PCX Format gegangen werden. PCX Dateien können mit Corel Draw über Grafik Import einer HPGL Datei und anschließenden Export einer PCX Datei vorgenommen werden. Der Nachteil ist, daß dieser Vorgang recht langwierig ist. Wesentlich schneller arbeitet das gute alte DOS Programm „printgl“, das über eine Batch Datei PLOT-PCX.BAT nur mit dem Dateinamen ohne Endung der HPGL Datei aufgerufen wird und die Endung HGL erwartet. Das ist auch die Grundeinstellung in MF. Mit einer weiteren Batch Datei PLOT-VGA.BAT läßt sich die HPGL Datei zur Kontrolle auch auf dem Bildschirm darstellen.

Im MF Meßprogramm werden im Menü *Plot PlotShop* alle Voreinstellungen für die HPGL Grafikdateien gewählt. Die voreingestellten Werte sind für farbige Standardbilder mit einer Grafik pro Datei richtig. Befindet sich eine Messung auf dem Bildschirm, so kann durch den Tastendruck P das Drucken auf einem Drucker oder in eine Datei gestartet werden. Zunächst erscheint noch ein Menüfenster, in dem ein Dateiname vorgeschlagen wird. Achtung: **Es wird immer nur der auf dem Bildschirm sichtbare Teil der Grafik gedruckt**. Soll z.B. eine Lautsprecherfrequenzgang von 20 Hz bis 20 kHz gedruckt werden, so ist zunächst der linke Curser mit der `Tastenfolge L, Alt B, P, Y, 20`↵ auf 20 Hz zu plazieren und anschließend der rechte Cursor mit `R, Alt B, P, Y, 20k`↵ auf 20 kHz. Taste `X` schaltet dann den gewünschten Ausschnitt als Bildschirmdarstellung. Mit Taste `G` läßt sich die Darstellung wieder auf den kompletten Bereich ausdehnen. Sehr einfach gestaltet sich dieser Vorgang, wenn die Bedienungsabfolge in einem Macro programmiert wird. Die Macro Aufzeichnung wird mit Alt M gestartet und beendet.

2.5 Dateiverwaltung

MF unterstützt Anwendungen durch mehrere Benutzer oder aus verschiedenen Verzeichnisse mit unterschiedlichen Einstellungen. Einzige Voraussetzung ist, daß sich MF selber in einem Verzeichnis befindet, das in der PATH Anweisung gesetzt ist. Im Weiteren hinterläßt MF in jedem Verzeichnis, aus dem es aufgerufen wurde eine kleine Datei (Pickfile genannt), die alle Einstellungen des Programms abspeichert. Bei einem erneuten Aufruf aus diesem Verzeichnis wird die Datei geladen und die alten Einstellung reproduziert. So können aus unterschiedlich Verzeichnissen verschiedene Einstellungen benutzt werden, ohne daß sie immer neu eingestellt oder gespeichert werden müssen. Für verschiedene immer wieder benötigte Meßabläufe, können Pickfiles gespeichert werden, die dann bei Bedarf sämtliche Einstellung für diese Betriebsart herstellen. Zu den in Kap. 8 befindlichen Beispielen finden sich ebenfalls Pickfiles auf der Programmdiskette, die alle Einstellung für die betreffende Messung in der notwendigen Form vornehmen.

Achtung: Bei einem Programmupdate können sich die Pickfiles ändern, so daß ältere Dateien nicht mehr gelesen werden können.

Zusätzlich gibt es gesonderte Setup Files für Macro-Programme und Einstellung für das Crossover Menu. Im *Utility Menu* können unter *PCK File Menu...* Pickfiles geladen und gespeichert werden. Ähnliches gilt für Makros im Menu *Macro* unter *Files* und für Crossover Setups im *Edit* Menu unter *Crossover work... Setup file menu*.

Die Meßdateien von MF unterteilen sich in drei grundsätzliche Varianten, als da wären die Zeitsignale, die Frequenzspektren und die Polardateien. Zeitsignale beinhalten direkt die Samples für den DA-Umsetzer oder die Samples aus dem AD-Umsetzer. Eine Rauschfolge, die für eine Messung als Anregungssignal benötigt wird, befindet sich z.B. in einer solchen Datei. Zeitsignale tragen in MF die Endungen .DAT. Bei der Dateiauswahl im Dateimenü oder auch bei der Darstellung der Signale kann mit den Tastenkombinationen Strg U und Strg M zwischen Zeit- und Frequenzbereich umgeschaltet werden. Im Dateimenü sind immer nur die zur jeweiligen Darstellung gehörigen Dateien sichtbar. Befindet man sich im Frequenzbereich und möchte ein Zeitsignal laden, so ist also zunächst mit Strg Z in den Zeitbereich zu wechseln. Im Frequenzbereich werden komplexe Frequenzspektren mit Betrag und Phase respektive Real- und Imaginärteil abgelegt. Die Dateiendung lautet hier .SPK. Eine weitere Dateiform gibt es für Polarmessungen. Polardateien werden im ASCII Format abgelegt und tragen die Endung .POX. **Achtung: Polarmessungen können zwar mit MF sehr einfach und gut durchgeführt werden, allerdings ist es nicht möglich die Ergebnisse**

in ihrer Gesamtheit nach einer Messreihe zu betrachten. Die weitere Auswertung einer solchen Datei erzwingt einen Aufruf von Windows und die Benutzung von Excel 5.0 zur Darstellung. Excel kann die von MF erstellte Datei als Fremdformat einlesen und in wunderschöne Polardiagramme und Isobarenkurven umsetzen. Näheres hierzu findet in den Erläuterungen zu einer Beispielmessung für Polardiagramme in Absatz 8.7 .

Alle Funktionen, die mit der Dateiverwaltung zusammenhängen finden sich Menupunkt *File*. Hier kann man in bekannter Form, wie auch bei vielen anderen Programmen, Dateien in einer Übersicht darstellen, Namen ändern, löschen und zur schnellen Übersicht die Kommentarzeile der Dateien ansehen. Ebenso kann von hier der Datei-Header eingesehen und geändert werden. Für den Import fremder Meßdaten steht ein Import- und Exportfilter für MLSSA FRQ Files im Frequenzbereich und ein frei definierbares Importfilter zur Verfügung. Im Zeitbereich können MLSSA TIM Files und unter Windows übliche WAV und VOC Files gelesen und geschrieben werden.

MF Zeitsignale und Frequenzspektren können mehrere Kanäle enthalten, so daß z.B. ein Stereo aufgezeichnetes Zeitsignal in zwei Kanälen vorliegt. Die maximale Kanalzahl ist 31, wobei die Numerierung bei Null Ch0 beginnt und bei Ch30 endet. Wird eine mehrkanalige Datei über das Dateimenü eingelesen oder gespeichert, so werden immer sämtliche Kanäle in vollem Umfang mit allen Samples bzw. Frequenzen geladen bzw. gespeichert. Sollen nur Teilbereiche aus einer Datei gelesen oder in eine Datei geschrieben werden, so sind die Funktionen *Read Block oder Write Block im Edit Menu* zu verwenden. Im Normalfall sollte das Speichern neuer Messungen immer über das Dateimenü erfolgen, so daß immer die komplette Messung in der Datei gesichert ist. Nach erfolgter Messung kann mit der Taste K zunächst ein kurzer Text in die Kommentarzeile geschrieben werden, so daß man sich auch zu späteren Zeiten noch an die Messung erinnert, und dann mit der Tastenkombination Alt D, S ein Dateiname ausgewählt werden. Die Dateiendung braucht nicht eingegeben zu werden, sie wird vom Programm automatisch in der passenden Form zum Typus des Signales ausgewählt.

Mit den Block Funktionen *Write und Read im Edit Menu* können Dateien miteinander in den verschiedensten Formen kombiniert werden. Der Vorgang läuft so ab, daß eine bereits eingelesene oder gemessen Datei je nach Einstellung im *Read Block* Menu mit der neu als Block ganz oder in Teilen nachgeladenen Datei verarbeitet wird. Sollen z.B. zwei Messungen miteinander verglichen werden, so kann die erste Datei wie gehabt über das Dateimenü ausgewählt und geladen werden. Die zweite Datei kommt jetzt über das *Edit* Menu und *Read Block* ins Spiel. Hier wird ebenso eine Datei in bekannter Form ausgewählt. Zusätzlich ist es jetzt aber möglich einzustellen, ob diese Datei einfach als zweiter Kanal im Bild erscheint oder mit der Ursprungsdatei z.B

multipliziert, dividiert oder auf andere Weise verknüpft wird. Soll die Abweichung zwischen zwei Messungen dargestellt werden, z.B. um die Paarabweichung bei Lautsprecher zu zeigen, so ist die Einstellung dividieren zu wählen. Die Ursprungsdatei wird dann durch die neu geladene Datei geteilt und das Ergebnis dargestellt. Die wichtige Funktion des Kombinierens wird noch unter Beispiele für eine Lautsprechermessung 8.3 genauer erläutert.

3 Die Menüs von MF

3.1 File

Im Dateimenü `File` (Alt F) können in bekannter Form Dateien mit Zeitsignalen oder Frequenzspektren eingelesen, gespeichert, gelöscht oder im Namen verändert werden. Angezeigt werden immer nur die Dateien, die mit der eingestellten Maske für die Dateiendung übereinstimmen. Vorgegeben ist hier *.DAT für Zeitsignale und *.SPK für Frequenzspektren. Abhängig davon, ob man sich gerade in der Zeit- oder Frequenzdarstellung befindet, erscheinen nur die zugehörigen Dateien mit Zeitsignalen oder Frequenzspektren. Im Dateimenü kann über die Tastenkombination *Ctrl T* oder *Ctrl B* vom Zeit- in den Frequenzbereich oder umgekehrt geschaltet werden. Durchläuft man die Dateiliste auf der rechten Seite des File Fensters, so werden in der Kommentarzeile oben die Kommentare aus den zugehörigen Dateien angezeigt.

File (Alt F)		
Parameter	**Funktion**	
Path	aktueller Pfad	
Mask	Dateimaske	
Name	Dateiname	
Load	Datei laden	
Save	Datei speichern	
New	Aktuelles Fenster löschen und ein neues anlegen Degree: Länge der FFT im Frequenzbereich Length: Anzahl der Abtastwerte für das neue Zeitsignale	
Edit header	Datei Header ansehen und editieren	
Rename	Dateiname ändern	
Delete	Datei löschen	
Make Dir	Neues Verzeichnis anlegen	
Size	Datei wird mit 1/2/3/4 bytes bei Zeitsignalen oder 4/8 bytes pro Sample bei Frequenzspektren gespeichert	

File (Alt F)		
	Achtung: Zum Export auf MAXILS müssen Zeitsignale 2 bytes/sample und Frequenzspektren 8 bytes/sample haben	
Format	Speicherformat: ITA, MLSSA (FRQ oder TIM), ...	
Remaining	freier Speicherplatz auf dem aktuellen Laufwerk	
Exit MF	MF verlassen	
DOS command	Wechsel auf die DOS Ebene	
Sort	Sortierkriterium für die Dateiliste Name/Datum/Größe ; aufwärts/abwärts	

Tabelle 1 Funktionen im File Menu

3.1.1 Datei Header

Jede Datei mit einem Zeitsignal oder Frequenzspektrum bekommt, wenn sie im ITA Format abgespeichert wird, einen 256 Byte langen Header voran gestellt. Der Header enthält Informationen über die Anzahl der Samples, die Abtastrate, die Anzahl der Kanäle, Datum und Zeit sowie die Darstellungsform, die beim Abspeichern gewählt wurde. Ebenso findet sich hier die Kommentarzeile, die vor dem Speichern editiert werden kann. Im Zeit- oder Frequenzbereich kann durch die `Taste K` in die Kommentarzeile gesprungen werden, wo neben einer schon eingetragenen Standardinformation noch eigene Texte eingegeben werden können, die einen späteren Umgang mit den Daten erleichtern.

```
/*****  ITA-Header für C-Programme   28.05.93   **********************/

struct ITA_header
       {
              long          Samplezahl;
              double        Samplingrate;
              int           Offset;
              char          Kanalzahl;
              char          Kanalliste[16];
              double        Voltagerange[16];
              int           Leftcursor;
              int           Rightcursor;
              char          len_ADDAident;
              char          ADDAident[20];
              char          len_Kommentar;
              char          Kommentar[71];
       } header_in, header_out;
```

Abbildung 4 Datei Header in C für Zeitsignale und Frequenzspektren (alte Definition von Maxils)

Der Aufbau des Headers ist in Abbildung 5 in seiner originalen Pascal-Notation dargestellt. Borland-C-Programmierer müssen die Strings mit einem getrennten Längenbyte beginnen, die ASCII-Nullterminierung ist überflüssig, aber nicht schädlich. Außerdem müssen sie die Compiler-Option "Word align data" ausschalten, sonst werden die Byteeinträge im Header mit einem Füllbyte gestreckt (Für Borland Pascal gilt dies nicht). Fremdprogramme müssen nur wenige Einträge setzen, damit Monkey Forest den Header versteht und die nachfolgenden Daten einlesen kann. Nicht gesetzte Einträge müssen allerdings unbedingt mit 0 initialisiert werden, z.B vorab mit "fillchar (Header,sizeOf (Header),0)". Die Einträge, die dananch unbedingt korrekt mit einem Wert > 0 gesetzt werden müssen, sind in der gleich folgenden Auflistung des Headers mit einem "!" markiert.

Zeitsignale: Die Abtastwerte werden als 16- oder 32-Bit-Integerzahlen in 2er-Komplement- darstellung abgespeichert. Beim Einlesen darf auch ein Offset vorhanden sein, der von den Samples abgezogen werden muß, um 2er-Komplementdarstellung zu erhalten. Er muß dann im Header angegeben werden. Bei mehrkanaligen Dateien alternieren die Abtastwerte der einzelnen Kanäle, wobei Kanal 0 der erste ist. Beispiel für ein 3-kanaliges Signal:

Header (256 Bytes)	K 0	K 1	K 2	K 0	K 1	K 2	K 0	K 1	K 2	K 0	K 1	K 2	......

Spektrumsdateien: Die Spektralwerte werden als 32- oder 64-Bit-Fließkommazahlen mit Real- und Imaginärteil abgespeichert. Die Realteile und Imaginärteile werden allerdings in getrennten durchgehenden Blöcken abgelegt. Der Realteil ist der erste Block hinter dem

Header. Ist das Spektrum mehrkanalig, so werden nach aufsteigender Kanalnummer abwechselnd die Real- und Imaginärteilblöcke weggeschrieben. Beispiel für ein 2-kanaliges Spektrum (nicht maßstabsgerecht):

Header (256 Bytes)	Realteil Kanal 0	Imaginärteil Kanal 0	Realteil Kanal 1	Imaginärteil Kanal 1

```
type  LinksRechts     = (links,rechts);

type  LRLongInt       = array [LinksRechts] of LongInt;

type  Headertyp       = record
       {Offset}
       {   0} SampleZahl     : longint;     {! Anzahl Samples pro Kanal}
       {   4} SamplingRate   : double;      {! Abtastrate in Hz}
       { 12} Adoffset : word; {Zeitsignale : Integer-Offset der AW's}
       { 14} Kanalanzahl     : byte; {1 : Mono, bis zu 31 sind erlaubt}
       { 15} KanalNr  : byte; {aktueller Kanal, 0 bis Kanalanzahl - 1}
       { 16} alleBearb       : boolean;     {1 : Editieren wirkt auf alle Kanäle}
       { 17} Preemphasis     : boolean;     {1 : 50/15 µs Preemphasis}
       { 18} LiCursAktiv     : boolean;     {1 : Linker Cursor aktiv}
       { 19} CursorKreuz     : boolean;     {1 : Horizontale Cursorlinie erscheint}
       { 20} CursorLock      : boolean;     {1 : Cursor bewegen sich gemeinsam}
       { 21} Darstellung     : MalTyp;      {0 : Punkte,1 : Striche, 2 : Balken}
       { 22} Odarstellung    : MalTyp;      {wie  , aber nur für Ortskurve}
       { 23} Bewertung       : char; {für Spektren : Bewertung als Buchstabe 'A'}
       { 24} HierEine0       : byte; {derzeit unbenutzt}
       { 25} NormMax0dB      : boolean;     {1 : Spektren und Leistung : 0dB = ¦Max¦}
       { 26} Yzoom    : boolean;     {1 : Y-Bereich auf Maximum normieren}
       { 27} Xlog     : boolean;     {1 : Spektren : Frequenz logarithmisch}
       { 28} Ylog     : byte; {YLog-Bits 1,2,4,8}
       { 29} VersionsNr      : byte; {früher 0, jetzt 95}
       { 30} FFTnorm  : byte; {0: Leistung, 1: Energie, 2: Passband}
       { 31} VoltageRange    : double;      {! max. Spannung im Zeitsignal}
       { 39} Reserviert      : array [0..59] of byte;      {mit Nullen füllen}
       { 91} Hun      : byte; {Hundertstel}
       { 92} Sec      : byte;
       { 93} Min      : byte;
       { 94} Hour     : byte; {Entstehungszeit des Signals}
       { 95} Day      : byte;
       { 96} Month    : byte;
       { 97} Year     : word; {Entstehungsdatum des Signals}
       { 99} Start    : longInt;     {(Nr-1) des ersten Wertes in Datei}
       {103} XachsSchrift    : string [3];  {Einheit an der X-Achse}
       {107} YachsSchrift    : string [3];  {Einheit an der Y-Achse}
       {111} Rand     : LRlongInt;   {dargestellter X-Bereich}
       {119} Cursor   : LRlongInt;   {Position der Cursorlinien}
       {127} Grundlaufzeit   : double;      { [s] }
       {135} d : dBBlock;
              {bestehend aus folgenden 3 Werten :
              {135} OberkantdB      : double;       dB an der Oberkante
              {143} Dynamik  : double;       Oberkante [db] - Unterkante [dB]
              {151} VoltBei0dB      : double;       Bezugsspannung für 0 dB}
       {159} LeftCursOld     : word;        {alt, für Signale bis Länge 65535}
       {161} RightCursOld    : word; {alt, für Signale bis Länge 65535}
       {163} ADDAident       : String [20]; {Quantisierung als ASCII-String}
       {184} Kommentar       : String [71]; {Beliebiges Blabla}
```

Abbildung 5 Datei Header in Pascal für Zeitsignale und Frequenzspektren (neue Definition von MF, die kompatibel zur alten Form ist)

```
/*****  ITA-Polheader für C-Programme  **********************/

struct ITA_Polheader
       {
              int            Startwinkel ;
              int            AnzahlSchritte ;
              int            Schrittweite ;
              char           len_Richtung ;
              char           Richtung[80] ;
              double         Abtastrate ;
              double         Startfrequenz ;
              int            AnzahlFrequenzen ;
              double         Frequenzfaktor ;
              double         Fensterbreitenfaktor ;
              double         Normwert ;
              double         dBWert ;
              double         ObereGrenzfrequenz ;
              char           len_Kommentar ;
              char           Kommentar[110] ;
       } Polheader_in, Polheader_out;
```

Abbildung 6 Datei-Header in C für Polarplots

3.2 Domain

Im Menupunkt zur Bereichsumschaltung `Domain` (`Alt O`) kann grundsätzlich zwischen dem Zeit- und Frequenzbereich umgeschaltet werden. Die Umschaltung betrifft nur die Darstellung. Alle Signale oder Spektren bleiben weiterhin im Speicher des Rechners erhalten. Nach einer Messung liegt das vom AD-Umsetzer gesampelte Zeitsignal unter `Time signal` vor. Die daraus errechnete Impulsantwort findet sich unter `Impulse response`. Wurde aus der Impulsantwort via FFT schon ein Frequenzspektrum errechnet, so findet sich die Amplitudendarstellung unter `Magnitude` und die Phasendarstellung unter `Phase`.

Domain (Alt O)			
Time Domain		**Funktion**	
Time signal	Ctrl T	Zeitsignal darstellen (eingelesene Zeitsignale aus Dateien oder nach einer Messung)	
Impulse response	Ctrl U	aus dem Zeitsignal errechnete Impulsantwort	
Power	Ctrl E	Leistungsdarstellung des Zeitsignales	
Int. impulse response	Ctrl N	Integrierte Impulsantwort für Nachhallzeitberechnungen	
Probability	Ctrl Y	Verteilungsfunktion eines Zeitsignales Die Funktion zeigt, wieviele Abtastwerte in einen bestimmten Amplitudenbereich fallen	
Distribution	Ctrl D	Verteilungsdichtefunktion eines Zeitsignales Die Funktion zeigt, wieviele Abtastwerte unter oder auf einen bestimmten Amplitudenwert fallen	
Frequency domain		**Funktion**	
Magnitude	Ctrl M	Betragsdarstellung eines Frequenzspektrums (Frequenzgang)	
Real	Ctrl R	Realteil eines Frequenzspektrums	

Domain (Alt O)			
Imaginary	Ctrl I	Imaginärteil eines Frequenzspektrums	
Phase	Ctrl P	Phasendarstellung eines Frequenzspektrums (Phasengang)	
Group delay	Ctrl L	Laufzeitdarstellung eines Frequenzspektrums (Gruppenlaufzeit)	
Nyquist Plot	Ctrl O	Nyquist Plot in der komplexen Frequenzebene (Ortskurve)	

Tabelle 2 Funktionen im Domain Menu

3.3 Display

Das `Display` Menu (Alt Y) erlaubt vielfältige Einstellungen des Darstellungsbereiches und Form auf dem Bildschirm. Ebenso können hier Cursorpositionen, Ausschnittvergrößerungen und Skalierung eingestellt werden. Einige andere Funktionen vereinfachen das schnelle Auffinden bestimmter Werte (z.B. Maximalwert) in Zeitsignalen oder Frequenzspektren.

Display (Alt Y)			
Menupunkt		**Funktion**	
All channels visible	A	Alle Kanäle sichtbar oder nur der aktive Kanal sichtbar	
Display range	D	Skalierung an der y-Achse	
Edit comment	K	Eingabe in die Kommentarzeile	
Jmp to Max of all channels	M	Setze den aktiven Cursor auf den größten Wert von allen Kanälen	
Make left cursor active	L	Linker Cursor aktiv (gelb)	
Make right cursor active	R	Rechter Cursor aktiv (gelb)	
Toggle active cursor	≡	Wechseln des aktiven Cursors	
Surrounding at cursor	U	Umgebung des aktiven Cursors darstellen	
Set window region	W	Ein Fenster im Zeitbereich setzen ; aktiver und passiver Cursor bestimmen Anfang und Ende des Fensters	
Zap drawing mode	Z	Umschalten zwischen Kurven, Punkt und Liniendarstellung	
+ Zoom in	+	Darstellung um den aktiven Cursor vergrößern	
- Zoom out	-	Darstellung um den aktiven Cursor verkleinern	

Display (Alt Y)			
= pull cursors together	=	Passiven Cursor gleich mit dem aktiven plazieren	
Expand cursors to 2^n	TAB	Anzahl der Abtastwerte zwischen den Cursorn auf den nächst größeren 2^n Wert setzen ; der aktive Cursor wird verschoben	
Reduce cursors to 2^n	↑ TAB	Anzahl der Abtastwerte zwischen den Cursorn auf den nächst kleineren 2^n Wert setzen ; der aktive Cursor wird verschoben	
Center arround cursor	↑ C	Darstellung um den aktiven Cursor zentrieren	
Cursor distance	↑ D	Einen festen Abstand zwischen den Cursorn vorgeben	
Find nice colors	↑ F	Bildschirmfarben einstellen (bei DSTN Displays liefert setup 2 bessere Ergebnisse)	
Entire, cursor ←→	↑ E	Die Cursor an den äußersten linken und rechten Rand des Signales schieben und alles darstellen	
Set mark	↑ K	Markierung setzen	
Jmp to impulse start	↑ I	aktiven Cursor in einem Zeitsignal einen Abtastwert vor dem Maximum plazieren	
Jmp to threshold	↑ T	aktiven Cursor in einem Zeitsignal an einem vorgegebenen Grenzwert plazieren	
Jmp to max active channel	↑ M	aktiven Cursor in einem Zeitsignal im Maximum des aktiven Kanales plazieren	
Jmp to zero transit	↑ Z	aktiven Cursor in einem Zeitsignal im Nulldurchgang plazieren	
Cursor position	↑ P	Position des aktiven Cursors über ein Eingabefenster in Abtastwerten oder direkt in Zeit- oder Frequenzgrößen vorgeben	
Jmp to mark	↑ Q	aktiven Cursor an einer Markierung plazieren	



Tabelle 3 Funktionen und Eingabefenster im Display Menu

3.4 Edit

Das `Edit` Menu (Alt E) stellt eine große Anzahl Möglichkeiten zur Bearbeitung von Zeitsignalen und Frequenzspektren bereit. Ebenso finden sich hier die Block Operation zum Einlesen zusätzlicher Kanäle und zur Verknüpfung gemessener Signale mit bereits bestehenden Dateien. Mit der Funktion *Channel work* können einzelne Kanäle einer Messung oder Dateien untereinander verknüpft und bearbeitet werden. Im Frequenzbereich findet sich hier das optionale Crossover Modul zur Berechnung von FIR Filtern für Frequenzweichen und Lautsprecherentzerrungen. Näheres hierzu im Absatz 9. Nicht alle Funktionen sind im Zeit- und Frequenzbereich verfügbar, so daß in der folgenden Tabelle in der zweiten Spalte angegeben wird, für welche Bereiche die Funktionen angewendet werden können.

T = Time Domain für Zeitsignale

F = Frequency Domain für Frequenzspektren

Edit (Alt E)			
Menupunkt	**Verfügbar in den Bereichen**	**Funktion**	
Add	T F	Addiert eine komplexe Konstante	
Crossover work	F	FIR Filterberechnung für Frequenzweichen und Lautsprecherentzerrung siehe auch Kap. 10	
Create bandpass	T	Erzeugt die Impulsantwort eines Wunschbandpasses	
Remove DC	T	Ermittelt den DC-Offset eines Zeitsignales und subtrahiert ihn vom Signal	
Delete	T F	Löscht den Bereich zwischen den Cursorn	
Extend	T	Verlängert ein Zeitsignal auf eine gewünschte Anzahl Samples	
Fade	T	Ein- Ausblenden eines Zeitsignales	
Generate	T	Generiert Testsignale im Zeitbereich z.B. Sinus, Rechteck, Rauschen, Sweep, ...	

Edit (Alt E)			
Insert	T F	Fügt eine gewünschte Anzahl Abtastwerte in ein Zeitsignal oder Spektrum ein	
J-Filter	T F	Erzeugt Filterfunktionen im Frequenz- oder Zeitbereich in allen gewünschten Varianten siehe auch Kap. 10.4	
Channel work	T F	Erlaubt die Verknüpfung der Signale einzelner Kanäle einer Datei untereinander	
Group Delay	F	Bearbeitet die frequenzabhängige Laufzeit eines Spektrums	
Multiply	T F	Multipliziert ein Zeitsignal oder ein Spektrum mit einer Konstanten (im Frequenzbereich auch mit komplexen Werten)	
Negate	T F	Vorzeichenwechsel ±	
Overwrite	T F	Überschreibt den aktiven Bereich mit einer Konstanten	
Phase	F	Bearbeitet den Phasenverlauf eines Spektrums	
Apply Window	T	Wendet eine Fensterfunktion auf ein Zeitsignal an	
Read Block	T F	Einlesen einer weiteren Datei als Block Die neue Datei kann als weiterer Kanal dargestellt oder mit bestehenden Kanälen verknüpft werden	
Smooth	F	Glättung eines Frequenzspektrums	
Time invert	T	Zeitliches Invertieren eines Zeitsignales	
Invert	F	Ein Frequenzspektrum wird in Phase und Betrag invertiert	
Cyclic move	T	Zyklisches Verschieben eines Zeitsignales	

Edit (Alt E)			
Write Block	T F	Schreibt die Samples Zwischen den Cursorn als Block im gewünschten Format weg (auch ASCII Format möglich)	
Extract	T F	Schneidet die Werte zwischen den Cursorn aus und erzeugt aus diesen ein neues Zeitsignal	
Byte/Sample	T	Schaltet um zwischen 2 und 4 byte pro Sample	
Sample rate conversion	T	Führt eine Abtastratenwandlung für ein Zeitsignal mit zugehöriger Tiefpaßfilterung aus	
Clip	T	Schneidet alle Werte oberhalb eines Grenzwertes ab (hartes Clipping)	
Differentiate	T	Differenziert ein Zeitsignal	
Envelope	T	Bildet die Hüllkurve	
Reduce to full periods	T	Reduziert ein periodisches Zeitsignal auf eine ganzzahlige Anzahl Perioden. Die restlichen Werte werden mit 0 überschrieben	
Integrate	T	Integriert ein Zeitsignal	
Up/Down Sampling	T	Führt eine Abtastratenwandlung für ein Zeitsignal mit zugehöriger Tiefpaßfilterung auf ein ganzzahliges Vielfaches oder einen ganzzahligen Bruchteil der ursprünglichen Abtastrate aus.	
Compress	T	Komprimiert ein Zeitsignal in der Art eines vorausschauenden Limiters	
Interpolate	T	Führt eine lineare Interpolation zwischen den Abtastwerten an den Cursorpositionen aus	
Normalize	T F	Normalisiert ein Zeitsignal oder Spektrum	

Edit (Alt E)			
		auf einen bestimmten Wert	
Raise to the power	T	Abtastwerte$^{(Power)}$ Vorzeichen bleibt erhalten	
Repeat block	T	Hängt den aktiven Bereich eines Zeitsignales am aktiven Cursor nochmals an	
Rectify	T	Gleichrichten eines Zeitsignales	
Smoothe	T	Glättet ein Zeitsignal durch Mittelung über eine bestimmte Anzahl Abtastwerte	
A (un)weighting	F	Multipliziert ein Frequenzspektrum mit der A-Bewertung oder macht dieses wieder rückgängig	
Uncle Hilbert	F	Berechnet über eine Hilbert Transformation eine Minimalphase zu einem gegebenen Amplitudenverlauf	
Mirror	F	Spiegelt ein Frequenzspektrum am aktiven Cursor	
Slope	F	Fügt eine Wunschflanke in eine Spektrumsdatei ein	
Stretch/squeeze	F	Dehnt oder komprimiert den Verlauf eines Frequenzspektrums	

Tabelle 4 Funktionen und Eingabefenster im Edit Menu

Alle Funktionen aus der vorstehenden Tabelle betreffen immer nur den aktiven Ausschnitt des Zeitsignales oder des Spektrums, der sich zwischen den Cursorn befindet. In den zugehörigen Eingabefenstern zu den einzelnen Edit Funktionen kann ausgewählt werden, ob die Funktionen alle Kanäle oder nur den zur Zeit aktiven Kanal beeinflußt. **Vorsicht: Es gibt häufig keine Möglichkeit die Signalbearbeitungen wieder rückgängig zu machen !!** Im Zweifel sollte daher das Signal oder Spektrum vorher gespeichert werden.

3.5 Info

Im *Info* Menu (Alt I) können über Zeitsignale und Frequenzspektren verschiedene Informationen über raumakustische Parameter, Signalstatistik, Spektrumsstatistik oder Verzerrungsanteile bezogen auf eine Grundwelle abgelesen werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, sich die Thiele Small Parameter eines Lautsprecherchassis berechnen zu lassen, wenn zwei Dateien mit Impedanzmessung des betreffenden Treibers mit und ohne eine definierte Zusatzmasse gemessen wurden. Näheres hierzu im Absatz 8.10.

Info (Alt I)			
Zeitsignale		**Funktion**	
Room acoustics	Impuls-antwort	Raumakustische Parameter einer Raumimpulsantwort	
IACC	Impuls-antworten	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient aus zwei Impulsantworten für das linke und rechte Ohr	
Signal statistics	Zeitsignal	Statistische Parameter eines Zeitsignales	
Decay Times	Integr. Impuls-anwort	Nachhallzeiten aus der intergrierten Impulsantwort	
Frequenzspektren			
Distortions		Verzerrungsanteile k2 bis k10 in einem Spektrum bei gegebener Grundwelle den aktiven Cursor auf der Grundwelle plazieren	
Spectral statistics		Statistische Parameter eines Frequenzspektrums	
Loudspeaker param.		Thiele Small Parameter eines Lautsprechers ; es werden zwei Impedanzmessungen benötigt eine mit und eine ohne Zusatzmasse	

Tabelle 5 Funktionen und Eingabefenster im Info Menu

3.6 Trans

Im `Transformations` Menu (Alt T) können verschiedene mathematische Transformationen einzeln aufgerufen werden und ein Standardablauf für die Verarbeitung des gesampelten Zeitsignales eingestellt werden. Die Einstellungen beziehen sich nicht auf die Messabläufe im *AD/DA Menu*.

Achtung: Das Processing sollte nur bei guter Kenntnis der Abläufe in der Signalverarbeitung abgeändert werden, da es sonst zu schwerwiegenden Darstellungsfehlern oder Fehldeutungen kommen kann.

Im Menüfenster Signal processing können die einzelnen Verarbeitungsschritte vom gesampelten Meßsignal bis zur Darstellung des Frequenspektrums eingestellt werden.

Trans (Alt T)			
Zeitbereich		**Funktion**	
Processing		Transformationsablauf für Messdaten - Hadamard-Transformation - Fensterung - Fourier-Transformation - Darstellung	☜
FFT	F	Fourier-Transformation eines Zeitsignales mit 2^n Werten in den Frequenzbereich	
Sliced FFT		Erzeugt bis zu 32 Spektren in der Form von Zerfallsspektren. Die Darstellung erfolgt in den Kanälen 0..31. Das Zeitfenster kann im Menu-Fenster `Sliced FFT` eingestellt werden.	
FHT	H	Hadamard-Transformation eines Zeitsignales mit 2^n-1 Werten	
IFHT	I	Inverse Hadamard-Transformation eines Zeitsignales mit 2^n-1 Werten	
ACF		Autokorrelationsfunktion eines Zeitsignales	
CCF		Kreuzkorrelationsfunktion von zwei Zeitsignalen in zwei Kanälen einer Datei	

Trans (Alt T)			
Frequenzbereich			
Processing		Ablauf der inversen Fourier-Transformation	
IFFT	I	Inverse Fourier-Transformation eines 2^n Werte Spektrums im Frequenzbereich in ein 2^n Werte langes Zeitsignal	

Tabelle 6 Funktionen und Eingabefenster im Trans Menu

Signal Processing (Alt T, P)			
Menupunkt		**Funktion**	
2^n-1 method		Liegen 2^n-1 Werte vor, so können diese über eine sample rate conversion (SRT) zu 2^n Werten gemacht werden oder zunächst eine Hadamard-Transformation (FHT) ausgeführt und der letzte Wert erneut angehängt werden, womit dann auch 2n Werte vorliegen Bei Messungen mit 2^n-1 langen Maximalfolgen (MLS) berechnet die FHT die Impulsantwort des gemessenen Systems und muß vor der FFT ausgeführt werden	
Sampling Rate Conversion		Abtastratenwandlung, so daß anschließend genau 2^n Werte im Zeitsignal vorliegen, die dann einer FFT unterzogen werden können	
FHT			
Interleave		Interleaved sampling Für Maximalfolgen-Messungen, bei denen die Folge mit x-facher Taktrate ausgesandt wird. Das Verfahren erlaubt auch Messungen mit x-facher Grenzfrequenz und erfordert einen externen MLS-Generator.	
Group delay comp.		Laufzeitkompensation der Impulsantwort nach der FHT	
Windowing			

Signal Processing (Alt T, P)			
Window		Fensterung der Impulsantwort nach der FHT	
FFT			
FFT Normalizing		Frequenzgang nach der FFT normalisieren *power* Leistung (abh. von der FFT Länge) *energy* Energie (unabh. von der FFT Länge) *passband* bei Filtern zur Bestimmung der realen Duchgangsverstärkung (z.B. bei Filterdateien für Hugo XFIR?.DAT)	
Spectral processing			
Equalizing		Frequenzgangkompensation nach der FFT mit einer Datei, mit der A-Kurve, mit sinc(x) oder mit einem in J-Filter einzustellenden Filter-Frequenzgang	
Channel combine		Falls mehrere Kanäle vorhanden sind, können diese nach der FFT im Frequenzbereich miteinander verknüpft werden	
Smooth		Glättung der Frequenzgänge	
Display			
Source of data		Darstellung der Frequenzgänge, wie in den nachfolgenden Parametern eingestellt oder, wenn das Zeitsignal aus einer Datei stammt, so wie es hier vorgegeben war.	
Dynamic range		Dynamikbereich (typ. 50/75/100 dB)	
On top		Wert an der Oberkante des Diagramms	
Ref. for 0 dB		0 dB Referenzwert z.B.: 1 V oder 20 µPa	
dB reference		Referenz für 0 dB, wie oben eingestellt oder Maximum der Kurve als Referenz für 0 dB	

Signal Processing (Alt T, P)			
Y scaling		Y-Achse linear oder log. skaliert	

Tabelle 7 Einstellungen im Signal processing Menu unter Trans (Alt T, P)

Sliced FFT (Alt T, S)			
Slices		Anzahl der Schritte, die das gewählte Zeitfenster über die vorliegende Impulsantwort geschoben wird (maximal 31)	
FFT Degree		Grad der FFT für das Zeitfenster (der Grad muß kleiner als der Grad der Impulsantwort)	
Start Detect		Automatische Suche des Starts der Impulsantwort	
Windowing			
Window Size		Fensterbereich in % von der FFT Länge z.B.: 50% bei FFT-Grad 13 ergibt $0{,}5 \bullet 2^{13}=4096$	
Overlap		Überlappung zweier aufeinander folgender Zeitfenster	
Slice Step		Die sich daraus ergebende Schrittweite zwischen zwei Zeitfenstern in ms	👓
Window			
Window type		Fenster Typ	
Slope		Fenster linksseitig, rechtsseitig, symmetrisch	
Mode		Normal oder invertiert	
Range		Alles oder ein einstellbarer Bereich	
Tukey		Durchlaßbereich (Fensterwert = 1)	
Zero DC		DC subtrahieren	

Tabelle 8 Einstellungen im Signal processing Menu unter Sliced FFT (Alt T, S)

3.7 AD/DA

Im *AD/DA* Menu finden sich alle Menüpunkte, aus denen eine Messung gestartet werden kann oder die AD- oder DA-Umsetzer angesprochen werden können. Ebenso findet sich hier der Menupunkt `Basic settings`, in dem das Hardware Setup eingestellt wird. Unter Miscellaneous können Umgebungsparameter wie Schallgeschwindigkeit oder Mikrophonempfindlichkeiten eingestellt werden.

AD/DA (Alt A)			
Basic settings	T F		Hardware Grundeinstellungen Portadressen, Kanalwahl, Empfindlichkeiten
Miscellaneous	T F		Schallgeschwindigkeit (Vorgabe: 340 m/s) Mikrophonempfindlichkeiten
Hear my cry (DA)	T	↑ H	Ausgabe eines Zeitsignales aus einer Datei über die DA-Umsetzer
AD only	T F		Nur AD-Betrieb zum sampeln beliebiger Signale z.B. für Messungen des Störpegels am Ausgang eines Gerätes
AD & DA simultanously	T F		Gleichzeitiger AD-und DA-Betrieb DA-Signal aus einer Datei z.B. für Messungen von Endstufen mit Sinus-Bursts
Recorder	T	↑ O	---
Micro calibration	T		Mikrokalibrierung mit Pistonphon
THD+N single f	F		Klirrfaktormessung bei einer Frequenz bis k10
THD+N (f)	F		Klirrfaktormessreihe in Abhängigkeit von der Frequenz
LS max SPL	F		Maximalpegelmessung bei Lautsprechern für einen vorgegebene Klirrfaktorgrenzen

AD/DA (Alt A)			
LS Sensitivity	T F		Frequenzgangmessung bei Lautsprechern mit Angabe der Empfindlichkeit
Frequency response	T F		Allgemeine Frequenzgangmessung
Polar Response	F		Messung von Polardiagrammen und Ansteuerung von verschiedenen Drehtellern Achtung: keine grafische Darstellung
Laser Vibrometer	F		---
Impedance	F		Impedanzmessung
SPL	F		Schalldruckpegel-Messung

Tabelle 9 Funktionen und Eingabefenster im AD/DA Menu (Alt A)

3.8 DSP

Dieser Menupunkt wird zur Zeit nicht unterstützt, da die zugehörige Hardware nicht mehr in Gebrauch und veraltet ist.

3.9 Plot

Im Menu `Plot` kann die direkte Druckerausgabe oder auch die Ausgabe in eine Grafikdatei konfiguriert und gestartet werden. Es wird immer nur der aktive Ausschnitt zwischen den Cursorn gedruckt.

Der Menupunkt `Plot Shop` beinhaltet alle notwendigen Voreinstellungen, die in der Standardvorgabe eine Grafik pro Datei oder Ausdruck vorsehen. Im Menupunkt `Plot` oder mit der Taste *P* kann der Druck gestartet werden. Zur einfachen Weiterverarbeitung mit anderen Programmen empfiehlt sich die Ausgabe in ein HPGL-File.

3.10 Macro

Alle Funktion von MF können in Tastaturmakros eingebunden werden, so daß in einfacher Weise gewünschte Funktionsabläufe selber programmiert werden können. Der Makrorecorder wird mit ALT M gestartet und beendet. Nach dem Abschluß der Makroaufzeichnung ist die gewünschte Funktionstaste zu drücken, die dann dieses Makro aufruft. Makros können auch in eigenen Dateien (*.TM) gespeichert und bearbeitet werden.

Macro (Alt R)		
Start recorder	ALT M	Startet und Beendet die Makroaufzeichnung abschließend eine Funktionstaste auswählen
Delete all		löscht alle Makros
Edit		Makros editieren
Files		Makros abspeichern, laden, löschen, ...

Tabelle 10 Funktionen und Eingabefenster im Macro Menu (Alt R)

3.11 Utility

Im `Utility` Menu (Alt U) können einige Einstellungen für MF, z.B. die Grafikauflösung, Tastaturrate oder Mausempfindlichkeit eingestellt und die Speicher und CPU Werte abgelesen werden.

Utility (Alt U)	
PCK File Menu	Pick File Verwaltung
More files	Standardname für Pickfile, Autosave für Pickfile, Autoview des Dateiheaders im File Menu
Dialogue manners	Stumme Nachrichten, Seriousness level
Graphics	Bildschirmauflösung 640x350 bis 1024x768
Keyboard & mouse	Tastaturrate und Mausempfindlichkeit
Memory & CPU	Speicheraufteilung und Prozessortyp keine Einstellmöglichkeit, dient nur zur Kontrolle
Computation times	Zeitdauer für die letzte FFT oder FHT keine Einstellmöglichkeit, dient nur zur Kontrolle
Delay	Delayzeiten zwischen zwei Messungen
Sound	Ausgabe von Audio Files
Notification	Textausgabe
RS232 cmd	RS 232 Konfiguration und Ausgabe

Tabelle 11 Funktionen und Eingabefenster im Utility Menu

3.12 Help

Hier findet sich ein ausführlicher Hilfetext zu MF, der aber nicht ganz auf dem neuesten Stand der Dinge ist. Die Grundlagen der Signalbearbeitung sind hier ausführlich und anschaulich beschrieben, so daß sich das Lesen trotzdem sehr lohnt. Die Text befindet sich in der Datei MFINFO.DOC und kann mit jedem einfachen Texteditor bearbeitet werden.

4 Vorbereitungen für eine Messung

4.1 Ein-/Ausgangspegel

Auch wenn es sich wiederholt, sei an dieser Stelle nochmals auf die Bedeutung einer richtigen Pegeleinstellung bei den Messungen hingewiesen, die maßgeblich das Resultat beeinflußt. Grundsätzlich sollte bei jeder Messung ein Blick auf den Aussteuerungsbalken rechts unten auf dem Bildschirm dazu dienen, sich über die Pegelverhältnisse zu vergewissern. Am Beginn der Signalkette steht das vom DA-Umsetzer über das Frontend ausgegebene Anregungssignal. Der höchst mögliche Pegel an den Ausgängen wird über das Menü *AD/DA Basic Settings* und *DA fullscale* eingestellt. Wird nun eine Messung gestartet, so kann im eigentlichen Messmenü der Pegel keinesfalls höher als dieser fullscale Wert eingestellt werden. Abschwächungen sind über eine interne Skalierung des Ausgangssignales natürlich jederzeit möglich. In allen Menüpunkten zum Start einer Messung wird der Wert in dB mit Bezug auf den fullscale Wert und zusätzlich in dBu angezeigt. Dieser Wert ist immer so zu wählen, daß ein am Frontend angeschlossenes Meßobjekt günstig ausgesteuert wird. Für die Messungen eines Equalizers mit normalen Linepegel Ein- und Ausgängen wäre z.B. ein Meßsignalpegel von 0 dBu sinnvoll. Ist das Meßobjekt selber hoch verstärkend, also z.B. eine Mikrophonvorstufe oder eine Endstufe, muß der Pegel soweit reduziert werden, daß im Messobjekt keine Übersteuerungen auftreten können. Vorsicht bei Lautsprechermessungen, wo zusätzliche 20 dB Verstärkung durch die Messendstufe im Frontend hinzukommen.

Ähnliches gilt für die Einstellung der Eingangsempfindlichkeit des Messfrontends. Zunächst ist der aus dem Meßobjekt zu erwartende Pegel abzuschätzen um dann den fullscale Wert der Eingänge mit einigen dB Sicherheit entsprechend einzustellen. Die geringsten Werte sind hier sicherlich von Meßmikrophonen (-40 bis -20 dBu) zu erwarten. Sehr große Pegel können bei der Messung von Endstufen auftreten (20 bis 40 dBu). Der Einstellbereich des Frontends umfaßt für fullscale einen Wertebereich von -40 bis +40 dBu. In der Regel reicht das aus, um alles, angefangen von sehr kleinen unempfindlichen Mikrophonen bis zur 1000 Watt Endstufe, abzudecken. Auch hier wieder das Beispiel der Messung an einem Equalizer. Der Ausgangspegel des Anregungssignales ist auf 0 dBu eingestellt. Je nach Einstellung können am Ausgang des EQs Pegel von +12 bis +20 dBu auftreten. Eine gute Einstellung für den fullscale Wert der Eingänge des Meßsystems wäre also +20 dBu.

Die Anpassung der Empfindlichkeit muß natürlich auch bei der Referenzmessung erfolgen. Ein Messobjekt ist jetzt nicht zu beachten, da direkt die Ein- und Ausgänge des

Meßsystem miteinander verbunden werden. Externe Verschaltungen werden dafür nicht benötigt, alles geschieht von der Software gesteuert über Relais im Frontend. Das Aufleuchten einer roten LED in Frontplatte des Meß-Frontends signalisiert den Zustand einer Referenzmessung. Bei der Referenzmessung sollte der auch für die weiteren Meßreihen benötigte Ausgangspegel eingestellt werden. Dieser wird dann für die Referenzmessung direkt auf den Eingang des Meßsystems gegeben, so daß der Eingangs fullscale Wert entsprechend einzustellen ist. Werden Ein- und Ausgang bei der späteren Messung mit normalen Line Pegeln betrieben, so ist in der Regel keine Änderung der Einstellung für die Referenzmessung notwendig. Wird dagegen ein Lautsprecher gemessen, wo sehr unterschiedliche Pegel anliegen zwischen Ein- und Ausgang des Meßsystems, so ist die Anpassung zwingend erforderlich. Ein Beispiel:

Der Lautsprecher wird mit dem Ausgang der Endstufe des Frontends verbunden und das Meßmikrophon mit dem Eingang. Der Pegel des Anregungssignales wird zu -10 dBu gewählt. Zusätzlich verstärkt die Endstufe um 20 dB, so daß am Lautsprecher das Meßsignal mit +10 dBu Pegel anliegt. Das Meßmikrophon hat einer geringe Empfindlichkeit von -40 dB (bezogen auf 1 V/Pa). Der Eingang ist für das Mikrophon also auf einen sehr kleinen fullscale Wert (z.B. -20 dBu) respektive eine hohe Verstärkung zu schalten. Würde nun mit dieser Einstellung auch die Referenzmessung gemacht, würde eine Übersteuerung des Eingangs durch das Endstufensignal das Ergebnis verfälschen. Schließlich wird für die Referenzmessung im Menupunkt `AD/DA LS Sensitivity` der Endstufenausgang nur über einen 20 dB Abschwächer auf den Eingang des Meßsystems durchgeschaltet. Also ist zunächst für die Referenzmessung der fullscale Wert für den Eingang soweit zu erhöhen, daß das Meßsignal vom Ausgang der Endstufe mit +10 dBu-20dB Pegel keine Übersteuerung verursachen kann. Die richtige Wahl für den eingangsseitigen Fullscale-Wert läge damit bei 0 dBu. Nach erfolgter Referenzmessung ist der Fullscale-Eingangswert wieder auf die Mikrophonspannung anzupassen. Geschieht dieses nicht, erhält man zwar ein Meßergebnis, das aber sehr stark mit Störungen behaftet sein kann, da das kleine Mikrophonsignal ohne weitere Verstärkung im Eigenrauschen des Meßsystem untergeht.

Grundsätzlich wird die Verwendung der *Autorange* Funktion empfohlen, die in wenigen Iterationsschritten die Eingangsempfindlichkeit sowohl bei der Referenzmessung als auch im normalen Messmodus optimal einstellt.

4.2 Anregungssignale

Als Anregungssignale können mit MF nahezu beliebige Formen erzeugt werden. Für Frequenzgangmessungen empfehlen sich Maximalfolgen, die hier auch in allen Menüs als Standard eingestellt sind. Unter kritischen Bedingungen bezüglich der Zeitinvarianz, z.B. bei Messungen von Lautsprechern im Freien, können Sweepsignal evtl. vorteilhafter sein. Genaueres hierzu findet sich im Kap. 8.15 und Kap. 7.

Alle Formen von Verzerrungsmessungen erfolgen mit Sinussignalen, die eine einfache Auswertung der Klirranteile zulassen. Beschränkungen entstehen lediglich bei Messungen des nichtlinearen Verhaltens durch den Eigenklirr der DA-Umsetzer, so daß die Messgrenze bei ca. –90 dB liegt. Dieser Wert zeigt sich für Lautsprechermessungen als völlig unproblematisch. Näheres hierzu in einem Beispiel zu Maximalpegelmessung bei Lautsprechern in Absatz 8.9.

4.2.1 Maximalfolgen

Maximalfolgen sind pseudostochastische Zufallsfolgen mit $N=2^n-1$ Werten, die in einfacher Weise mit einem rückgekoppelten Schieberegister oder per Software erzeugt werden können. Die Energiedichte ist gleich über alle Frequenzen. Maximalfolgen erlauben einen guten Störabstand durch eine gleichmäßige Energieverteilung über den Zeitraum einer Folge, ohne daß ein Meßobjekt kurzzeitig mit sehr hohen Pegeln strapaziert werden muß. Ein weiterer Vorteil liegt in der einfachen Weiterverarbeitung mit dem Algorithmus der schnellen Hadamard-Transformation.

Der Messvorgang läuft so ab, daß eine Maximalfolge im PC generiert und als Meßsignal über einen DA-Umsetzer an den Eingang des Messobjektes gelegt wird. Am Ausgang des Meßobjektes wird das Signal von einem AD-Umsetzer wieder aufgenommen und zur weiteren Verarbeitung im PC bereitgestellt. Mit der schnellen Hadamard-Transformation wird nun zunächst die Impulsantwort des Meßobjektes berechnet. Eine weitere Transformation, die schnelle Fourier-Transformation, errechnet aus der Impulsantwort die Übertragungsfunktion mit Phase und Betrag im Frequenzbereich. Der meßbare Frequenzbereich erstreckt sich annähernd von 0 Hz bis zur halben Samplefrequenz, die für dieses Meßsystem zwischen 5,5 und 48 kHz gewählt werden kann. Die maximale Länge der Impulsantwort errechnet sich aus der Samplefrequenz f_s und der Folgenlänge N mit N/f_s. Der Kehrwert f_s/N ergibt die Auflösung in der Frequenzgangdarstellung. Charakterisiert wird eine Maximalfolge über ihren Grad n. Eine typische Einstellung für Messungen in der Audiotechnik wäre eine Folge vom Grad 15 bei einer Abtastrate von 44,1 kHz, womit sich eine Frequenzauflösung von $44100\,Hz/2^{15} = 1{,}34\,Hz$ einstellen

würde. Werden noch höhere Auflösungen gewünscht, kann entweder die Länge der Folge vergrößert oder die Abtastrate reduziert werden. Moderne Rechner liefern auch bei sehr großen Folgenlängen vertretbare Verarbeitungszeiten, so daß nur in Notfällen von der Standard-Abtastrate von 44,1 kHz abgewichen werden sollte.

Wie bereits erwähnt, ist bei Maximalfolgen die Leistungsverteilung gleichmäßig über alle Frequenzen, was bei der Messung von Endstufen, Equalizern, Mischpulten etc. durchaus sinnvoll ist. Bei der Messung von Lautsprechern sprechen zwei Gründe gegen die Verwendung dieser Leistungsverteilung. Zum einen werden Lautsprechermessungen häufig durch tieffrequenten Störsignale z.B. Windgeräusche verfälscht, was den Wunsch nach einem verbesserten Störabstand durch höhere Pegel im tieffrequenten Bereich erzeugt. Eine breitbandige Pegelerhöhung würde allerdings Mittel- und Hochtonsysteme übermäßig belasten. Ohnehin entfällt der absolut größte Teil der Leistung des Meßsignales bei herkömmlichen Maximalfolgen auf den Hochtonbereich, was schon einigen zarten Hochtönerchen das Leben gekostet hat. Für eine Trennfrequenz von 2 kHz entfallen 90% der Signalenergie auf den Hochtöner und die restlichen 10% auf den Tieftöner. Aus dieser Problematik entstand zwangsläufig der Wunsch nach frequenzgewichteten Maximalfolgen, die einen höheren Energieanteil im Tieftonbereich haben. Neben der Möglichkeit selber neue Maximalfolgen mit einer Wunschverteilung zu erzeugen, liegen schon für Lautsprechermessungen nach S.Müller optimierte Rauschfolgen als Dateien vor. In allen Menüpunkten zum Start einer Messung können diese bei der Wahl des Anregungssignales unter *`exciter origin`* mit *`file`* und dem zugehörigen Dateinamen ausgewählt werden. Vorgefertigte Folgen mit dem Namen Erdnuß, liegen für den Grad 9 bis 16 dem Programm bei. Die Frequenzgewichtung einer solchen Folge zeigt Abbildung 7. Der tieffrequente Bereich wird bei einer Messung mit diesen Folgen deutlich stärker angeregt, was in einem verbesserten Störabstand für diesen Frequenzbereich resultiert. Werden ausschließlich Mittel- und Hochtonsysteme gemessen, so macht diese Gewichtung natürlich keinen Sinn. Hier sollten auch weiterhin die internen Folgen mit der Einstellung *`exciter origin intern`* eingestellt werden.

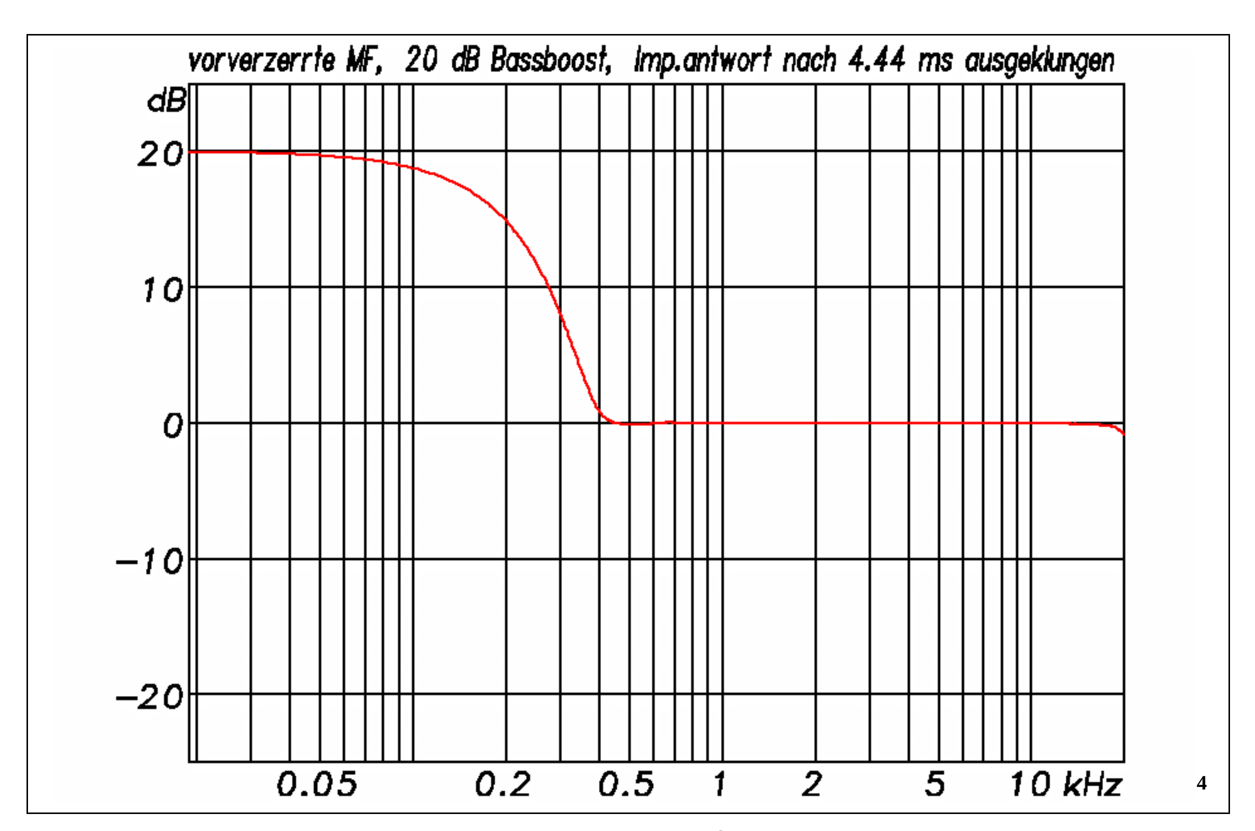


Abbildung 7 Frequenzgewichtung einer Erdnuß Folge

Der Frequenzgang des Anregungssignales wird durch eine Referenzmessung berücksichtigt und in den folgenden Meßabläufen automatisch kompensiert. Näheres hierzu im folgenden Absatz 4.4 .

4.3 Sweepsignale

Zur Zeit noch in Bearbeitung. Siehe auch Kap. 8.15

4.4 Referenzmessung

Alle Frequenzgangmessungen mit MF können mit einer vorab gemachten Referenzmessung kompensiert werden. Zu diesem Zweck wird das Meßobjekt überbrückt, was beim Aufruf der Referenzmessung automatisch in der Meßhardware geschieht. Die Referenzmessung beinhaltet nun die Übertragungsfunktion der gesamten Meßkette mit Ausnahme des eigentlichen Meßobjektes. Sämtlich Frequenzgangabweichungen die durch gewichtete Folgen, Filter, AD-, DA-Umsetzer, Vor-, Endverstärker verursacht werden, sind somit in der Referenzmessung enthalten. Nach der Referenzmessung werden alle weiteren Messungen mit dieser Referenzdatei kompensiert, d.h. von Fehlern bereinigt. Als einfacher Test kann nach erfolgter Referenzmessung der Ein- und Ausgang des Meßsystems durch ein Kabel verbunden werden, worauf ein absolut gerader Frequenzgang auf dem Bildschirm erscheinen sollte. Ist dieses nicht der Fall, so liegt wahrscheinlich ein zu hoher oder viel zu niedriger Pegel an den Eingängen des Meßsystems vor. Die Kompensation durch die Referenzdatei erfolgt im Frequenzbereich, so daß die im Meßablauf zuvor berechnete Impulsantwort noch mit allen Fehlern behaftet ist. Durch die Schalterstellung *`postcomp`* für *`impulse response`* im Meßmenu wird nach der Kompensation im Frequenzbereich die Impulsantwort des Meßobjektes über eine inverse Fourier-Transformation aus dem korrigierten Frequenzgang neu berechnet und entspricht dann auch ausschließlich der Impulsantwort des Meßobjektes. Grundsätzlich wird diese Einstellung empfohlen, um Mißverständnisse bei der Auswertung der Impulsantwort im Zeitbereich zu vermeiden. Die Verarbeitungszeit verlängert sich durch die zusätzliche Transformation geringfügig.

4.5 Bildschirmdarstellung

Die Darstellung der Meßergebnisse kann im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen. Während eines Meßablaufes liegen verschiedene Verarbeitungsstufen vor, zwischen denen im *Domain Menu* umgeschaltet werden kann. Die wichtigsten Darstellungsformen sind hier die Impulsantwort im Zeitbereich, der Frequenz- und Phasengang sowie die Gruppenlaufzeit im Frequenzbereich. Nach einer abgeschlossenen Messung liegen alle Informationen vor und es kann beliebig in der Darstellungsform gewechselt werden. Betrachtet man z.B. den Frequenzgang eines Lautsprechers und möchte die zugehörige Impulsantwort auf Reflexionen oder andere Störeinflüsse hin prüfen, so kann einfach mit `Strg Z` auf die Impulsantwort umgeschaltet werden. Die zugehörigen Tastenkürzel zur Umschaltung auf die anderen Darstellungsformen können im *Domain Menu* hinter den Einstellung abgelesen werden.

Die Darstellung auf dem Bildschirm kann die gesamte Messung oder aber nur einen beliebigen Ausschnitt aus einem Frequenzgang oder einer Impulsantwort umfassen. Auf eine vollständige Darstellung kann jederzeit mit der Tastenkombination `Shift G` umgeschaltet werden. In der Darstellung gibt es zwei Cursor, die dann automatisch an den Anfang und an das Ende gesetzt werden. Soll nur ein bestimmter Ausschnitt auf dem Bildschirm erscheinen, so sind die Cursor an den Rändern des gewünschten Bereiches zu plazieren. Mit der Taste `x` wird die Darstellung auf diesen Bereich umgeschaltet. Die Cursor können mit den Cursortasten, der Maus oder auch über den Menupunkt Display Cursorposition positioniert werden. Welcher der beiden Cursor der aktive ist (an der gelben Farbe zu erkennen) kann über die Tasten `L` für linker Cursor oder *R* für den rechten Cursor gewählt werden. Die zum jeweiligen Cursor gehörigen Werte der x- und y-Achse sind unterhalb des Diagrammes abzulesen. Alle Operationen, die das Meßergebnis beeinflussen und im Edit Menu ausgewählt werden können, beziehen sich immer nur auf den aktiven Bereich zwischen den Cursorn. Soll z.B ein Frequenzgang komplett um 3 dB angehoben werden, so sind zunächst die Cursor mit `Shift E` am Anfang bzw. Ende der Messung zu plazieren und dann ist die Funktion *Multiply* im *Edit Menu* auszuwählen. Ähnliches gilt bei mehrkanaligen Darstellungen oder Dateien, wo alle Funktionen des Edit Menüs nur den aktiven Kanal betreffen. Sollen alle Kanäle bearbeitet werden, so ist im jeweiligen Fenster die Auswahl für alle Kanäle zu treffen. Einzelne Kanäle werden durch die zur Kanalnummer gehörigen Zifferntaste aktiviert. Die Numerierung beginnt mit Kanal 0.

Unterhalb der Grafik auf dem Bildschirm befinden sich noch einige Tastenkombinationen für Umschaltmöglichkeiten in der Darstellung.

Funktion	**Taste**	**Bedeutung**
y-Norm	**Y**	Darstellung auf den größten Wert im aktiven Bereich normieren
x-Zoom	**X**	Nur den aktiven Bereich zwischen den Cursorn darstellen
entire	↑ **E**	Alle Werte bzw. Samples darstellen
cursorlock	**O**	Cursorabstand fest auf den gegebenen Abstand einstellen
all channels lines	**a**	alle Kanäle sichtbar
crosshair	**c**	Cursorkreuz statt Linie
Y-Log	↑ **Y**	Logarithmische Darstellung der Y-Achse
X-Log	↑ **X**	Logarithmische Darstellung der X-Achse

Tabelle 12 Skalierungsfunktion für die Bildschirmdarstellung und Druckausgabe

5 Meßmikrophone und Verstärker

Die Auswahl der Meßmikrophone, deren Vorverstärker oder auch der Endverstärker zum Betrieb der Lautsprecher bei einer Messung ist zunächst einmal als unkritisch zu betrachten. Einzige unbedingte Voraussetzung ist, daß alle genannten Geräte bei den gewünschten Messungen nur geringe nichtlineare Verzerrungen erzeugen. Keinesfalls darf also z.B. eine Endstufe oder ein Mikrophonverstärker bei der Messung übersteuert werden. Sehr einfach gestaltet sich der Vorgang, wenn man auf die im Meßfrontend integrierten Komponenten zurückgreift. Der Eingang erlaubt den Anschluß nahezu aller Mikrophontypen, die mit einer Phantomspeisung von 48 V betrieben werden können. Ebenso kann die Eingangsempfindlichkeit in weiten Bereich angepaßt werden. Eine Ausnahme stellen diejenigen Mikrophone dar, die mit einer höheren Phantomspeisung (z.B 200 V bei B&K 4165, etc.) betrieben werden müssen und daher einen eigenen Vorverstärker benötigen. Die Verstärkung dieser Vorstufe muß im Meßprogramm unter *Preamplifier Gain* angegeben werden, um richtige Schalldruckwerte zu erhalten. Ebenso ist die Mikrophonempfindlichkeit in mV/Pa im *AD/DA* Menu unter *Miscellaneous* einzutragen. In der Regel ist dieser Wert dem Datenblatt des Mikrophones zu entnehmen. Wenn ein Pistonphon mit definiertem Schalldruck zur Verfügung steht, so kann im Zeitbereich unter im *AD/DA* Menu unter *Micro-Kalibrierung* eine genaue Erfassung der Mikrophonempfindlichkeit incl. aller Abweichung durch Vorverstärker etc. erfolgen.

Nur wenige und sehr teure Mikrophone erfüllen die Voraussetzung eines völlig geraden Frequenzganges im Audiofrequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz. Einfachere und deutlich preiswertere Mikrophone können trotzdem sehr gut für genau Messungen eingesetzt werden, wenn sie vorher einmal mit einem Referenzmikrophon verglichen werden und der Frequenzgangfehler in einer Kompensationsdatei festgehalten wird. Diese Kompensationsdatei wird vergleichbar der Referenzmessung zur Korrektur des Messergebnisses herangezogen, so daß die Frequenzgangfehler des einfachen Mikrophones kompensiert werden können. Die Kompensation erfolgt automatisch, wenn im Fenster zur Referenzmessung bei Lautsprechermessungen die Kompensation aktiviert und der Dateiname der Kompensationsdatei eingetragen wird.

Bestimmte Messungen verlangen den Einsatz einer externen Endstufe. Soll z.B. der Maximalpegel eines großen Lautsprechers bestimmt werden, so reicht natürlich die zarte Endstufe im Meßfrontend nicht aus, um den Lautsprecher an seine Grenzen zu treiben. Eigentlich ist das auch schon der einzige Fall, der eine externe Endstufe zwingend erforderlich macht. Im Fenster für die Maximalpegelmessung im AD/DA Menu ist für diesen Fall die Verstärkung der Endstufe unter Amplifier Gain einzutragen. Soll ein zu

messender Lautsprecher mit einer bestimmten Endstufe betrieben werden, so ist diese an den Line-Ausgängen des Meßfrontends anzuschließen. Für eine korrekte Wirkungsgradangabe der Lautsprecher muß auch diese Endstufe in die Referenzmessung mit einbezogen werden. Der Lautsprecherausgang ist dafür während der Referenzmessung mit dem Line-Eingang des Meßfrontends über einen geeigneten Adapter zu verbinden. Im Fenster der Referenzmessung ist dabei auf externe Referenz zu schalten. Interne Referenz bedeutet hier, daß die im Frontend eingebaute Endstufe verwendet wird und deren Ausgang für die Referenzmessung auf den Messeingang geschaltet ist.

6 Messungen an Lautsprechern

Welche meßtechnischen Verfahren und Eckwerte einen Lautsprecher sinnvoll charakterisieren und einen möglichst guten Rückschluß auf seine klanglichen Eigenschaften zulassen, stellt heute immer noch einen Streitpunkt unter Anwendern und Entwicklern dar. Neben der landläufigen Meinung, daß die Qualitäten eines Lautsprechers nicht meßbar sind, sondern nur über den Höreindruck zu erfahren, gibt es verschiedene Fraktion, die der einen oder anderen Meßmethode entscheidende Bedeutung beimessen. An dieser Stelle sei nur das Thema Sprungantwort eines Lautsprechers genannt, das wie kein anderes die Meinungen polarisiert. Die eine Seite erkennt aus der Sprungantwort nahezu alles über den Lautsprecher, während von der anderen Seite der Sprungantwort als meßtechnische Aussage keine Bedeutung beigemessen wird. In den folgenden Absätzen soll daher eine kurze Übersicht über die möglichen Messungen an Lautsprechern gegeben und auf einige Besonderheiten hingewiesen werden. Insgesamt umfaßt die dort vorgestellte Meßreihe das lineare Übertragungsverhalten, das Verzerrungsverhalten respektive das nichtlineare Übertragungsverhalten und das räumliche Abstrahlverhalten.

6.1 Komplexer Frequenzgang

Die eigentliche Frequenzgangkurve (Abbildung 8/links) ist die wohl meist gezeigte Meßkurve eines Lautsprechers, die auf Achse des Lautsprechers aufgezeichnet wird und möglichst eine Aussage über die Empfindlichkeit enthalten sollte, die sich auf eine Entfernung von 1 Meter und eine Klemmenspannung bezieht, die an der nominellen Impedanz der Box einer Leistung von 1 Watt entsprechen würde. Die obere und untere Grenzfrequenz des Lautsprechers und der Grad der Abweichung von einem gewünschten Verlauf lassen hier erste Aussagen über den klanglichen Charakter und die tonale Abstimmung zu. Als Randwerte sollten Angaben über die Messbedingungen, z.B. über eine zeitliche Fensterung der Impulsantwort zur Vermeidung von Interferenzen durch Reflexionen oder auch über einer mögliche Glättung der Kurve gemacht werden. Zur Glättung der Kurve hat sich ein Wert von 1/6 Oktave als praxistauglich und gehörrichtig bewährt.

Zur Beurteilung der Ursachen von Welligkeiten im Frequenzgang kann ein Zerfallsspektrum (Abbildung 8/rechts) betrachtet werden. Das hier dargestellte Ausschwingverhalten eines Lautsprechers läßt resonierende Gehäuse oder sich in Partialschwingungen ergehende Membranen leicht erkennen. Einbrüche im Frequenzgang stellen sich hier häufig als lang nachschwingende und verspätet einschwingende mechanische oder akustische Resonanzen heraus, deren klangliche Auswirkungen deutlich schwerwiegender sein können, als es die Abweichungen im Frequenzgang vermuten lassen würden. Besondere Vorsicht ist hier geboten, wenn der Frequenzgang durch elektrische Vorfilter korrigiert werden soll und sogar noch eine Pegelanhebung an Resonanzstellen erfolgt, was in der Regel zu klanglichen Verschlechterungen führt. Das in Abbildung 8 dargestellte Beispiel zeigt eine solche Resonanzstelle bei ca. 600 Hz, die im Frequenzgang als Einbruch und im Zerfallsspektrum als Resonanz auftritt.

An dieser Stelle sollte ein Sonderfall erwähnt werden. Die häufig bei Beschallungslautsprechern anzutreffenden Hochtontreiber mit 3 oder 4 Zoll großen Membranen erzeugen durch die unvermeidlichen Partialschwingungen dieser Membranen bei hohen Frequenzen gerne sehr fein strukturierte Welligkeiten in Größenordnungen von 5-10 dB, die sich dann auch durch entsprechendes Nachschwingen äußern. Trotz dieser augenscheinlichen Problemstellen konnten aber bei dieser Art Unebenheiten im Frequenzgang keine klanglichen Beeinträchtigung festgestellt werden, soweit sie in Bereichen von 8 kHz aufwärts lagen. Auch wenn die technischen Möglichkeiten mit fein auflösenden Digitalfiltern bestehen, hat es sich eher als problematisch herausgestellt diese Abweichungen entsprechend zu entzerren. Klangliche Verbesserungen konnte hierdurch grundsätzlich nicht erzielt werden.

Der im Beispiel in Abbildung 8 gezeigt Lautsprecher erreicht bezüglich des Ausschwingverhaltens im Hochtonbereich ein hervorragendes Verhalten. Ein hier eingesetzter Bändchenhochtöner, bei dem die Antriebskraft gleichmäßig verteilt auf der gesamten Membranfläche angreift, kennt die Problematik der Partialschwingungen so nicht und weist daher eindeutige Vorteile auf.

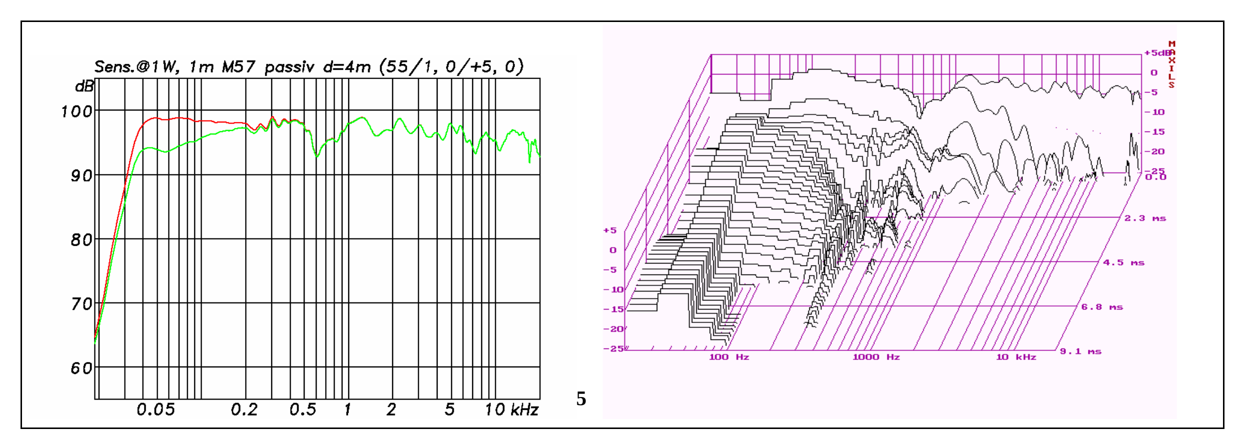


Abbildung 8 Frequenzgang (l) und Zerfallsspektrum (r) eines Lautsprechers

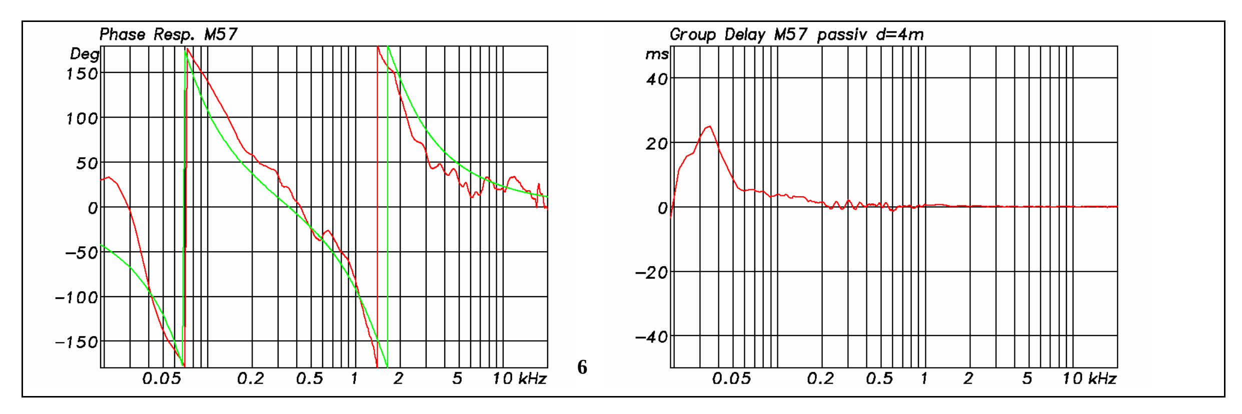


Abbildung 9 Phasengang (l) und Laufzeitverhalten (r) eines Lautsprechers

Zum komplexen Frequenzgang gehört neben dem Betragsspektrum auch der Phasenverlauf. Ein einzelnes Lautsprecherchassis kann dabei weitgehend als minimalphasiges System aufgefaßt werden, was für Mehrwegesystem nicht mehr uneingeschränkt gilt. Der in Abbildung 9/links gezeigt Phasenverlauf eines 2-Wege Beispiellautsprechers weist über den gesamten Frequenzbereich eine Phasendrehung von 2x 360 Grad auf, die im unteren Frequenzbereich weitgehend dem minimalphasigen Anteil eines korrespondierenden Hochpaßfilters 4.Ordnung für das Bassreflexsystem entspricht. Der Hochtonweg für sich betrachtet, stellt einen Hochpaß 2.Ordnung dar, der eine Phasendrehung von 180 Grad mit sich bringt. Zusammen mit der Frequenzweiche 2.Ordnung entstehen so weitere 360 Grad Phasendrehung. Die zweite Kurve in Abbildung 9/links entspricht den beiden idealisierten Hochpaßfiltern 4.- und 2.Ordnung für Tief- und Hochtöner sowie der Frequenzweiche 2.Ordnung. Abweichung vom

minimalphasigen Anteil und starke Phasendrehungen deuten im Bereich der Trennfrequenzen auf Laufzeitdifferenzen der einzelnen Wege zueinander hin, die abhängig von der räumlichen Anordnung der einzelnen Wege zueinander auch von der Meßposition abhängen können. Differenziert man die Phase nach der Frequenz, so ergibt sich die Gruppenlaufzeit, deren Verlauf für das Beispielsystem in Abbildung 9/rechts dargestellt ist. Dominiert wird der Verlauf hier durch den kräftigen Anstieg zu tiefen Frequenzen, der sich zwangsläufig aus der als Hochpaßfilter 4.Ordnung wirkenden Tieftoneinheit in einem Bassreflexgehäuse mit einer Tuningfrequenz von 36 Hz ergibt. Deutlich stärker fällt dieser Anstieg bei noch höheren Filterordnungen aus, wie sie z.B. mit elektrischen Vorfiltern bei einer Butterworth Abstimmung 6.- oder gar 8.Ordnung anzutreffen ist. Klare Vorteile können hier geschlossene Gehäuse verbuchen, die nur einer Hochpaßfunktion 2.Ordnung entsprechen. Hier beträgt die Gruppenlaufzeit für eine Eckfrequenz von 36 Hz nur 7 ms gegenüber 18 ms bei einer Abstimmung 4.Ordnung und 28 ms für die Funktion 6.Ordnung. Die im PA-Sektor gelegentlich anzutreffende Abstimmung 8.Ordnung steigt hier sogar auf 42 ms an. Der Höreindruck so ausgeprägter Laufzeiten im Bassbereich wird oft als schleppender und nicht mehr zu Musik passender Bass bezeichnet. Mittels eines DSP-Systems ist es nun leicht möglich, über ein digitales FIR-Filter einem Lautsprecher ein ideales Laufzeit respektive Phasenverhalten anzueignen oder auch das Verhalten eines Lautsprechers nachzustellen. Hörversuche mit unterschiedlichen Filtern, die eine Simulation des Laufzeitverhaltens verschiedener Filtertypen zur Abstimmung des Tieftöners erlaubten, resultierten recht eindeutig zu Gunsten der Varianten mit einem möglichst geringen Laufzeitanstieg zu den tiefen Frequenzen. Entsprechend positiv in der Bewertung der Hörergebnisse schnitten dann Lautsprecher ab, deren Laufzeitverhalten im Bassbereich durch ein FIR-Filter kompensiert wurde. Als unvermeidlicher Nachteil stellt sich bei diesem Verfahren natürlich eine entsprechend hohe Grundlaufzeit in der Größenordnung von 20-50 ms ein, die sich bei vielen Einsätzen im Studio und auf der Bühne leider verbietet.

6.2 Zeitverhalten

Als Fortsetzung des Gedankenganges aus dem vorhergehenden Absatz, soll nun die Betrachtung des Phasen- und Amplitudenganges im Zusammenhang mit dem Zeitverhalten erörtert werden. Während Frequenz- und Phasengang als Größe über der Frequenz aufgetragen sind, zeigt die Sprungantwort die Reaktion des Lautsprecher auf einen Spannungssprung. Der Schalldruckverlauf wird aufgezeichnet und über der Zeitachse aufgetragen. Ähnliches gilt für die Impulsantwort, wo die Reaktion des Lautsprechers auf einen sehr kurzen Spannungsimpuls beobachtet wird. Alle drei Darstellungsweisen, d.h. der komplexe Frequenzgang mit Phaseninformation, die Impulsantwort und die Sprungantwort lassen sich allerdings ohne Verluste ineinander überführen und beinhalten alle eine absolut identische Information über das zu beschreibende System. Mathematisch betrachtet errechnet sich die Impulsantwort über eine inverse Fouriertransformation aus dem komplexen Frequenzgang und die Sprungantwort über eine zeitliche Integration aus der Impulsantwort. Umgekehrt ist die Impulsantwort durch Differenzieren aus der Sprungantwort zu berechnen und der komplexe Frequenzgang über eine Fouriertransformation aus der Impulsantwort.

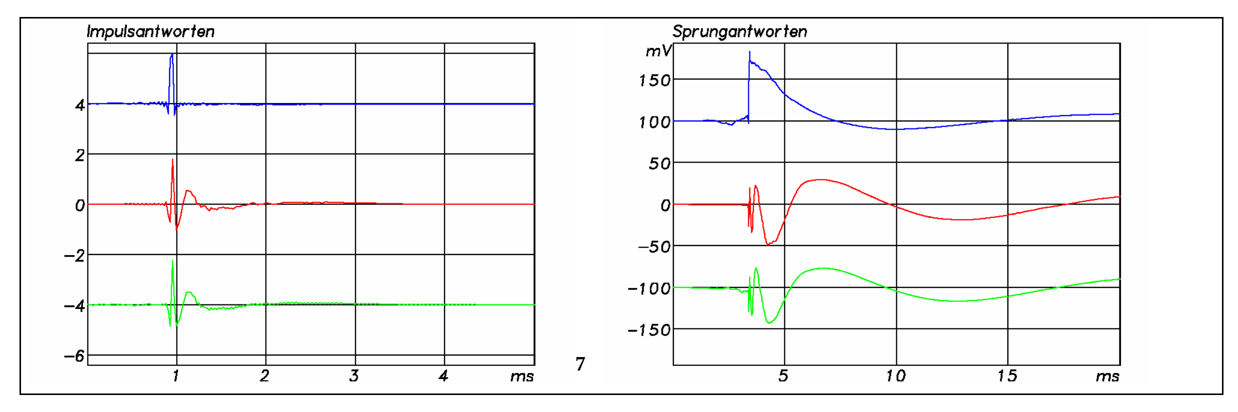


Abbildung 10 Impuls- (l) und Sprungantworten (r) der 3 Lautsprecher

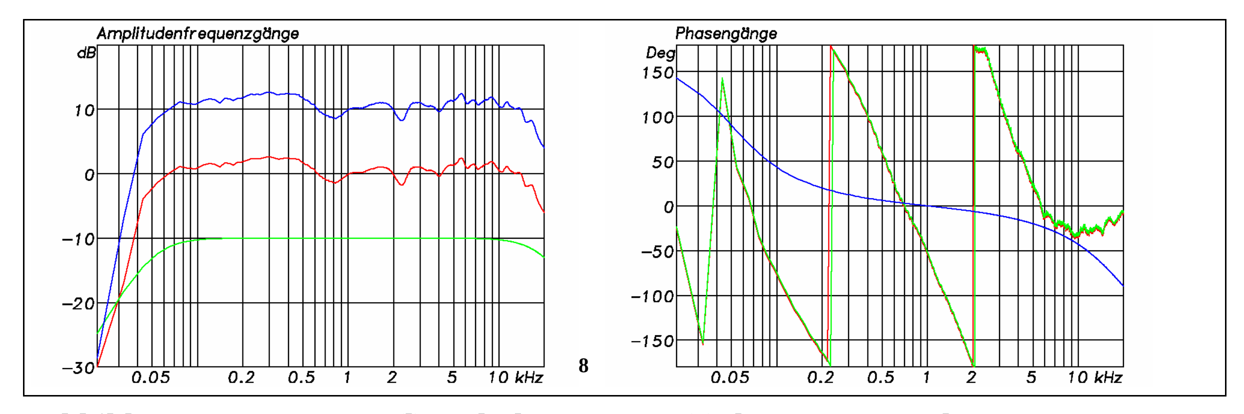


Abbildung 11 Frequenz- (l) und Phasengänge (r) der 3 Lautsprecher

Ein Beispiel mit einem 2-Wege Lautsprecher und zwei daraus konstruierten Fällen soll hier zur Anschauung dienen. In der ersten Variante werden Phasengang und Frequenzgang des real existierenden 2-Wege Lautsprechers sowie die zugehörigen Impuls- und Sprungantworten dargestellt. In der Abbildung 10 und Abbildung 11 ist das immer die mittlere Kurve. Der zweite Fall ist ein künstlich konstruierter Lautsprecher, der den Frequenzgang des original Lautsprechers hat, aber den Phasenverlauf eines idealen Übertragers mit einer 50 Hz und 20 kHz Hoch- und Tiefpaßbegrenzung. Die zugehörigen Kurven sind in der Abbildung 10 und Abbildung 11 oben dargestellt. Die dritte Variante (untere Kurve in Abbildung 10 und Abbildung 11) übernimmt nur den Phasengang des realen Lautsprechers und erhält einen idealen Frequenzgang, der auch wieder durch den 50 Hz und 20 kHz Hoch- bzw. Tiefbaß begrenzt ist. Sehr schön ist an diesen Beispielen zu erkennen, wie Phasen- und Frequenzgang das zeitliche Übertragungsverhalten eines Lautsprechers beeinflussen. Während zwischen den Zeitsignalen in Abbildung 10 kaum Unterschiede zwischen der realen Box und der Variante mit einem idealen Frequenzgang zu erkennen sind, unterscheidet sich der Lautsprecher mit einem idealen Phasengang erheblich und zwar in der Form, daß der angestrebte Sprung bzw. der Impuls fast optimal wiedergegeben wird.

Der Phasengang des realen Lautsprechers dagegen führt dazu, daß Anteile aus unterschiedlichen Frequenzbereichen quasi auseinander laufen. Deutlich separieren sich hier auch die Einschwingvorgänge von Tief- und Hochtöner. Überraschend ist dieses Ergebnis natürlich nicht, da es nur die einfachen Zusammenhänge der Signaltheorie wiedergibt.

Interessant sind dagegen die widersprüchlichen Aussagen in der Psychoakustik, die zum einen behaupten, daß das menschliche Gehör nur über sehr geringe Fähigkeiten des Phasenhörens verfügt und somit kaum Unterschiede zwischen der Variante mit dem idealen Phasen- respektive Zeitverhalten und dem realen Lautsprecher zu hören sein dürften. Von gleicher Seite wird dagegen dem Frequenzgang eine große hörphysiologische Bedeutung beigemessen, so daß auch Abweichung von weniger als 1 dB klar auszumachen sein sollen. Die andere Fraktion mißt dagegen dem Phasengang und dem Zeitverhalten eines Lautsprechers die größere Bedeutung für den Höreindruck bei.

Für ein einfaches Experiment können die drei vorab beschriebenen Lautsprecher mit einem FIR-Filter sehr hoher Auflösung simuliert werden. Einige Hörversuche mit den drei entsprechenden Filtervarianten, die im Frequenz- und Phasengang sowie im Zeitverhalten exakt die Verläufe aus Abbildung 10 und Abbildung 11 nachgebildet haben, wurden mit unterschiedlichem Programmaterial durchgeführt. Zum Abhören wurde ein elektrostatischer Kopfhörer eingesetzt, da Lautsprecher ihrerseits wiederum das

Übertragungsverhalten beeinflußt hätten und somit keine korrekte Beurteilung möglich gewesen wäre. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß zwischen dem original Lautsprecher und der Variante mit ausschließlich optimierten Phasenverlauf kein Unterschied festzustellen war. Blieb dagegen die Phase unverändert und der leicht wellige Amplitudenverlauf des realen Lautsprecher wurde kompensiert, so waren durchaus geringfügige Unterschiede wahrnehmbar. Es sei auch nochmals darauf hingewiesen, daß der grundsätzliche Verlauf des Frequenzganges mit einer Hochpaßfilterung bei 50 Hz und einer Tiefpaßfilterung bei 20 kHz jeweils 2.Ordnung auch bei der im Amplitudenverlauf entzerrten Version beibehalten wurde, um Irritationen durch einen insbesondere im Tieftonbereich ausgedehnteren Übertragungsbereich zu vermeiden.

Als Resümee aus diesen Hörversuchen kann daher festgestellt werden, daß eine Phasen- bzw. Laufzeitentzerrung nur dann hörbare Vorteile erbringt, wenn extreme Laufzeiten kompensiert werden können, so wie es z.B. bei den vorab genannten Tieftonsystemen mit Hochpaßabstimmungen hoher Ordnung der Fall ist. Gleiches gilt für Laufzeiten, die durch sehr steile Frequenzweichenfilter mit Flankensteilheiten von mehr als 48 dB/Okt. entstehen. Die von nicht pathologischen konstruierten Lautsprechern verursachten Laufzeiten bzw. Phasenverläufe sind dagegen bezüglich ihrer Hörbarkeit als unkritisch zu betrachten.

6.3 Verzerrungswerte

Die Verzerrungswerte von Lautsprechern aller Art stellen für den Anwender eine der wichtigsten Größen für die Auswahl der möglichen Einsatzbereiche dar. Leider beschränken sich auch heute viele Hersteller immer noch auf eine einzige wenig aussagekräftige Angabe für einen Maximalpegelwert, der zudem keinerlei Bezug zu einem Frequenzbereich hat. Wesentlich anschaulicher ist dagegen eine Kurve über dem gesamten angestrebten Frequenzbereich, die entweder den Klirrfaktor bei konstanter Eingangsspannung anzeigt oder den maximal erreichbaren Pegel bei einem vorgegebenen Klirrfaktorgrenzwert. Beide Diagramme können mit PC gestützten Meßsystemen leicht aufgezeichnet werden. Als Meßsignal können hier Sinusbursts verwendet werden, die nach der Übertragung über den Lautsprecher mit einer FFT Analyse auf ihre Klirranteile hin untersucht werden. Die Beispielkurven in Abbildung 12 wurden mit 180 ms langen Bursts und einer 4K FFT zur Klirrfaktoranalyse gemessen. Bei dieser Meßmethode stellt sich in einigen Fällen bei der Maximalpegelbestimmung das Problem ein, daß bei Lautsprechern mit Schutzfunktionen gegen dauernde thermische Überlastung, wie sie fast bei jedem Hochtöner in der Studio- oder Beschallungstechnik zu finden sind, durch ein Ansprechen der Schutzschaltung der Pegel kräftig reduziert wird. In der Tat ist es so, daß konservativ eingestellte Limiter bei Sinusbursts dieser Länge schon ansprechen müssen, obwohl sie bei normalem Programmaterial erst bei drastischen Übersteuerungen greifen würden. In solchen Fällen kann die Meßdauer und FFT-Länge nur für den Hochtonbereich hinreichend weit verkürzt werden, ohne daß die Auflösung zu gering wird.

Eine weitere Problemstelle bei dieser Art Messung sind Reflexionen, die durch Interferenzen zu erheblichen Meßfehlern führen können. Durch die Messung mit Sinussignalen in vorgegebenen Frequenzabständen (typisch 1/6-1/12 Oktave) ist auch eine weitere Mittelung über mehrere Werte nicht zu empfehlen. Es sollte daher dringend auf eine völlig reflexionsfreie Umgebung geachtete werden. In Abbildung 12/links sind solche Problemstellen bei 65 Hz und 85 Hz zu erkennen, die durch die nicht mehr reflexionsfreien Wände des Meßraumes unterhalb von 100 Hz entstehen. In gewissen Grenzen lassen sich solche Problemstellen durch eine zweite Meßreihe mit geringerem Meßabstand reduzieren. Beide Meßreihen können später kombiniert werden, wobei die Messung in größerer Entfernung als Pegelbezug dient.

Für Studiolautsprecher hat sich die Darstellung des Klirrfaktors bei konstanter Eingangsspannung Abbildung 12/rechts als gutes Kriterium herausgestellt. Je nach der angestrebten Abhörentfernung und dem gewünschten Pegel ist hier gut zu erkennen, welchen Klirrfaktor der Lautsprecher erzeugt und wie sich die Werte aus harmonischen

Verzerrungen 2.- und 3.Ordnung zusammensetzen. Für Beschallungssysteme eignet sich dagegen eher die zweite Form, bei der ein Grenzwert für den THD-Wert vorgegeben wird. Als Grenzwerte haben sich 1%, 3% und 10% THD bewährt. Die 1% Kurve hat hier zwar wenig Praxisbezug, läßt aber ein schnelles Erkennen möglicher Schwachstellen zu. Die 10% Kurve dagegen gibt recht gut den praktischen Nutzpegel wieder, den ein Lautsprecher zu erzeugen in der Lage ist. In beiden Fällen sollte ein möglichst ausgeglichener Verlauf ohne herausragende Bereiche angestrebt werden. Größere Einbrüche in bestimmten Bereichen deuten nicht nur auf Schwachstellen in der Konstruktion hin, sondern können auch zu merklichen Verzerrungen und zu einem unsauberen Klangeindruck führen. Abhängig vom wiederzugebenden Programmaterial können Überhöhungen in der Maximalpegelkurve in gewissen Frequenzbereichen sinnvoll sein. Neben den teilweise recht weit gehenden Anforderungen moderner Musik im Bassbereich, sollte vor allem der Grundtonbereich Beachtung finden. Pegelreserven an dieser Stelle erlauben es dann auch, ohne weitere Kompression durch Limiter einzugehen, Stimmen oder einzelne Instrumente bei einem hohen Gesamtpegel noch hervorzuheben. Viele Beschallungslautsprecher weisen allerdings genau hier einen Schwachpunkt auf. Die häufig anzutreffenden Kombinationen aus direktstrahlenden Basslautsprechern und horngeladenen Low-Mid Systemen in Kombination mit einer tiefen Trennfrequenzen von 100-150 Hz führt nicht selten zur einer Überforderung der gerne zu klein gestalteten Hörner. Der Verlust an Empfindlichkeit in diesem Bereich erzwingt kräftige Kompensationen durch die Controller, die dann zwar zu einem ausgeglichenen Frequenzgang führen, aber keine adäquaten Schalldrücke mehr zulassen ohne die Treiber zu überfordern.

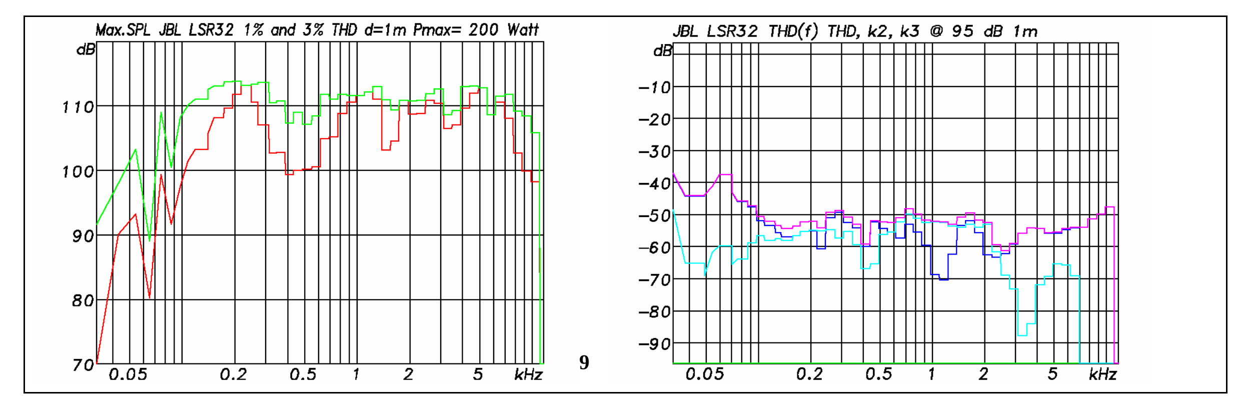


Abbildung 12 Maximaler Pegel bei einem bestimmten Klirrfaktorgrenzwert (l) und THD, k2 und k3 bei einem definierten Pegel (r)

Häufig ist zu beobachten, daß Kurven unterschiedlicher Grenzwerte in der Darstellung zusammenfallen (siehe Abbildung 12/links), was grundsätzlich nicht sein kann, da die Werte eindeutig definiert sein müssen. Die Ursache hierfür ist in möglichen Leistungsgrenzen der treibenden Endstufen oder durch einen Limitereinsatz zu finden,

die eine weitere Pegelerhöhung nicht zulassen. Speziell bei empfindlichen Kalottenlautsprechern sollte die maximal zugeführte Leistung auf sinnvolle Werte begrenzt werden, da diese Lautsprecher nur sehr wenig Klirrfaktor erzeugen und ohne weitere Schutzmechanismen stark gefährdet sind, einer Überlastung zu erliegen.

6.4 Räumliches Abstrahlverhalten

Das räumliche Abstrahlverhalten von Lautsprechern kann mit oder weniger gleicher Aussagekraft in verschiedenen Formen dargestellt werden. Die traditionelle Darstellungsweise besteht aus Polardiagrammen, die für bestimmte Frequenzbereiche (Terzen oder Oktaven) das Richtverhalten eines Lautsprecher in einer Ebene darstellen. Bei einer Auflösungen in Terzen erfordert diese Form der Darstellung dann schon ca. 30 einzelne Kurven, so daß gerne auch zu Isobarenflächen (siehe Abbildung 13) oder dreidimensionalen Bildern gegriffen wird, die das Richtverhalten in einer Ebene für den gesamten Frequenzbereich in einer Grafik übersichtlich zeigen.

Das hier aufgeführte Beispiel eines großen PA-Lautsprechers mit einer Twin-Koax Hornanordnung ist auf „Constant Directivity“ optimiert und erzielt ab ca. 500 Hz bis zu den höchsten Frequenzen eine nahezu konstante Richtwirkung von 60x40 Grad bezogen auf einen Pegelabfall von 6 dB gegenüber der Mittelachse. Soll mit diesen Lautsprechern ein größerer Raumbereich abgedeckt werden, so können entsprechend viele Systeme zueinander mit diesen Winkeln angeordnet werden. Durch die sauberen Richteigenschaften kann dann das Verfahren angewandt werden, daß immer nur ein Lautsprecher für einen bestimmten Winkelbereich zuständig ist und Interferenzeffekte weitgehend vermieden werden. Auf Grund der beschränkten Abmessung der Low-Mid Hörner weitet sich der Abstrahlwinkel zu tiefen Frequenzen unweigerlich auf, wie es auch hier in Abbildung 13 unterhalb von 500 Hz zu erkennen ist. Ein optimales Zusammenspiel mehrerer System wird unterhalb dieser Frequenz dann möglich, wenn der Abstand der Lautsprecher zueinander so gering ist, daß ein gleitender Übergang in den Bereich der akustischen Kopplung erfolgt. Das Beispielsystem verhält sich hier geradezu mustergültig und läßt eine problemlose Kombination mehrerer Lautsprecher ohne größere Interferenzbereiche oder Lücken zu. Unregelmäßigkeiten sowie Sprungstellen in den Isobarenkurven sollten daher für Lautsprecher, die auch als Gruppe bzw. Cluster eingesetzt werden, unbedingt vermieden werden.

Ebenso ist bei Beschallungslautsprechern unter dem Aspekt der Rückkopplungsproblematik auf seitliche Nebenmaxima zu achten. Häufig bilden sich Nebenmaxima in der vertikalen Ebene eines Lautsprechers aus, wie es auch in Abbildung 13/unten bei ca. 500 Hz zu erkennen ist. Wird ein solches System als Zentrallautsprecher über einer Bühne und damit über den Mikrophonen angebracht, so tritt unvermeidlich ein verstärktes Rückkopplungsproblem in diesem Frequenzbereich auf.

Weniger kritisch verhält es sich dagegen, wenn der Lautsprecher ausschließlich als Einzel-system, wie es z.B. bei einer Studio-Abhöre der Fall ist, betrieben wird. Typische

Lautsprecher mit Konus und Kalottensystemen weisen hier der Anzahl ihrer Wege entsprechend Sprungstellen in den Isobarenkurven auf, die in ihrer charakteristischen Form einem Tannenbaum ähneln. Unter der hypothetischen Annahme, daß sich der Hörer immer in der Nähe der Mittelachse eines Lautsprechers befindet und die Umgebung weitgehend reflexionsfrei wäre, könnte sogar behauptet werden, daß alles, was der Lautsprecher außerhalb seiner Mittelachse abstrahlt, von untergeordneter Bedeutung ist. Sobald allerdings ein umgebender Raum angeregt wird, kommen über Reflexionen bzw. Nachhall wieder alle Anteile die ein Lautsprecher rundum abstrahlt mit ins Spiel. Abhängig vom Absorptionsverhalten des Raumes betrifft das vor allem die mittleren und tiefen Frequenzen. Eine weitere Messung des Leistungsfrequenzganges in einem Hallraum kann hier Aufschluß bieten. Im diffusen Schallfeld werden alle Anteile, die der Lautsprecher abstrahlt, erfaßt. Die Energiedichte im diffusen Schallfeld ist proportional zur abgestrahlten Leistung und auch zur Nachhallzeit des Raumes. Die Nachhallzeit ist allerdings auch in Hallräumen stark frequenzabhängig und muß deshalb zunächst noch in der Messung kompensiert werden.

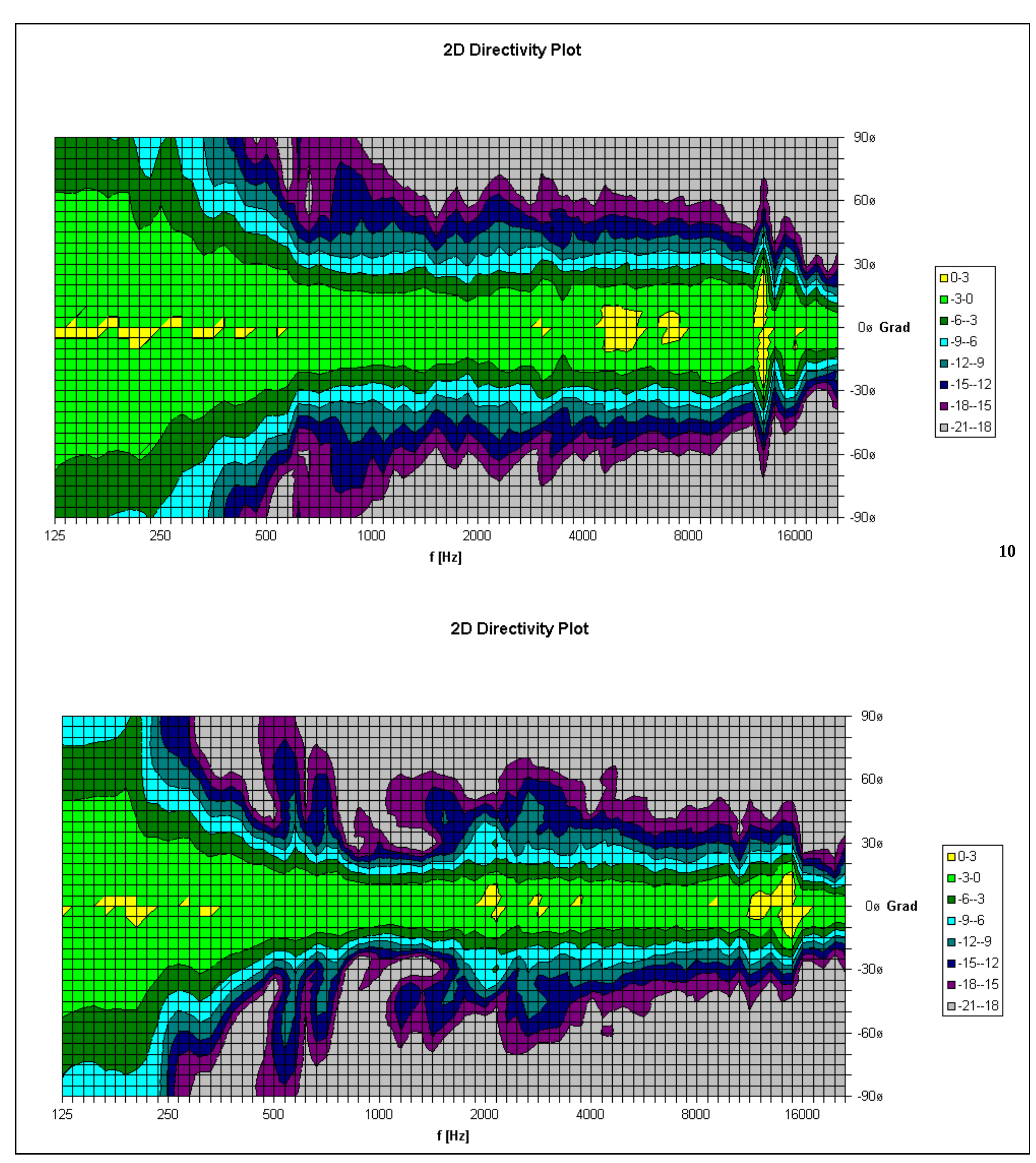


Abbildung 13 Horizontales (o) und vertikales (u) Abstrahlverhalten in der Isobarendarstellung (3 dB/div)

Für den Beispiellautsprecher sind der Freifeldfrequenzgang und der bereits um die Nachhallzeit kompensierte Diffusfeldfrequenzgang in Abbildung 14/links dargestellt. Unterhalb von 200 Hz kann wegen der ausgeprägten einzelnen Raummoden die Hallraummessung nicht mehr bewertet werden. Darüber erkennt man die bis ca. 1 kHz stetig abnehmende Kurve im Diffusfeld. Darüber hinaus stellt sich ein fast konstanter Verlauf ein, wie es bei einem konstanten Abstrahlwinkel sein sollte, der aber zwischen 2 und 4 kHz um ca. 3 dB nach oben abweicht. Diese Abweichung bedeutet, daß der

Lautsprecher hier mehr Energie in den Raum abstrahlt. Je nach räumlicher Umgebung, wo ein solcher Lautsprecher betrieben wird, wird sich diese Überhöhung mehr oder weniger stark im Höreindruck wiederfinden. Aus diesen Messungen wurde die in Abbildung 14/rechts abgebildete EQ-Kurve zur Kompensation des Diffusfeldfrequenzganges eingestellt. Wie weit es nun Sinn macht, den Diffusfeldfrequenzgang über ein Filter zu kompensieren, hängt von Nachhall des Raumes ab, so daß die Kurve als Anhaltspunkt für den Verlauf einer Filtereinstellung gesehen werden kann, die dann in ihrer Dynamik bei Bedarf abgeschwächt wird.

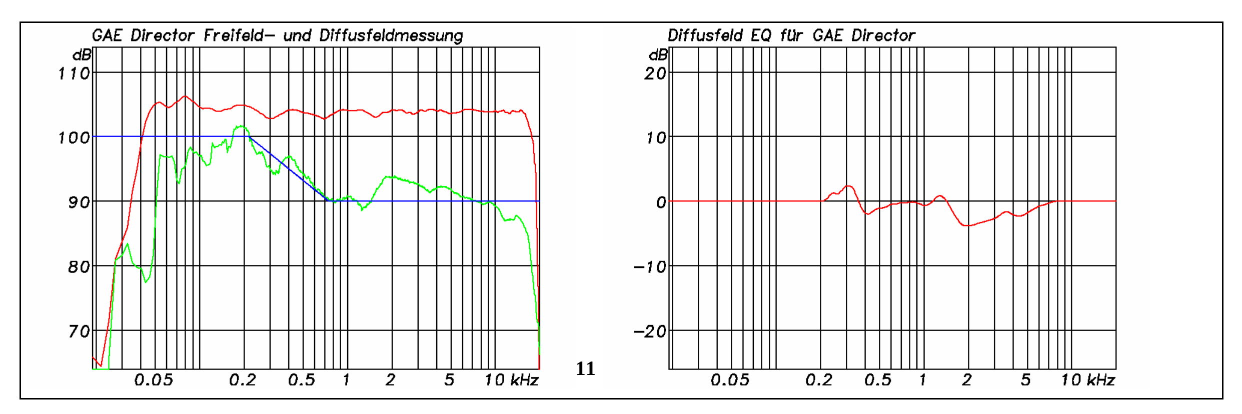


Abbildung 14 Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang (l) und die daraus abgeleitete Diffusfeld EQ-Kurve (r)

Der tendenzielle Verlauf der Diffusfeldkurve läßt sich auch schon aus der Isobarendarstellung in Abbildung 13 vermuten, wo sich hier in der vertikalen Ebene die Bereiche der Überhöhungen bzw. Einbrüche schon durch Aufweitungen und Einschnürungen abzeichnen. Trotzdem sollte auf eine Hallraummessung nicht verzichtet werden, da die beiden Isobarenkurven natürlich nur die horizontale und vertikale Ebene erfassen. Die Hallraummessung berücksichtigt dagegen alle Richtungen. Alternativ hierzu bietet es sich an, im Freifeld auf einem Kugelrasternetz um den Lautsprecher eine Vielzahl Frequenzgänge aufzunehmen, wie es auch für die Lautsprecherdaten in Raumsimulationsprogrammen üblich ist. Für eine Auflösung von 5 Grad kommen hier freilich schon 2812 Meßpunkte zusammen, deren Erfassung mit einer aufwendigen mechanischen Schwenkvorrichtung geraume Zeit in Anspruch nimmt. Aus dieser Datensammlung läßt sich dann ebenfalls der Frequenzgang im diffusen Schallfeld und weitere Größen wie Bündelungsmaß und Q-Faktor berechnen. Anschaulich hat diese Meßmethode den großen Vorzug, daß man das Richtverhalten in einer 3-dimensionalen Darstellung betrachten und sehr gut beurteilen kann. Nebenmaxima und Lücken im Abstrahlverhalten sind hier auch gut zu beobachten.

6.5 Zusammenfassung

Zur meßtechnischen Charakterisierung eines Lautsprechers können Frequenzgang, Zerfallsspektrum sowie Maximalpegelkurven und Isobarendarstellungen einen umfassenden Eindruck liefern. Wie weit die einzelnen Kriterien von größerer oder kleinerer Bedeutung sind, hängt unter anderem vom Einsatzbereich eines Lautsprechers ab. Als entscheidende Feststellung kann aber gesagt werden, daß nur unter Beachtung aller Kriterien ein sicheres Urteil gefällt und ein Zusammenhang zum Höreindruck hergestellt werden kann. Des weiteren können zwischen einigen meßtechnischen Abweichungen, wozu krasse Laufzeitwerte, Nachschwinger im Zerfallsspektrum und Unregelmäßigkeiten in der Richtcharakteristik zählen und den klanglichen Eigenschaften eines Lautsprechers sichere Beziehungen festgestellt werden.

7 Swens kleine Meßkunde

Grundvoraussetzung für jeden Versuch, das Übertragungsverhalten eines Lautsprechers zu begradigen, ist selbstverständlich die Kenntnis seines Frequenzgangs. Ausgehend von den verschiedenen Meßverfahren, die zunächst dessen Ermittlung lediglich an einem Punkt (also dort, wo sich das Meßmikrophon befindet) ermöglichen, werden in diesem Kapitel auch die Korrekturmöglichkeiten bei Erweiterung auf einen größeren Raumbereich, den Betrieb in halliger Umgebung sowie dem Einsatz größerer Lautsprecher-Cluster kurz erörtert.

Prinzipiell eignet sich zur Lautsprechermessung jedes Verfahren, welches den Frequenzgang nach Amplitude und Phase in ausreichend kleinen Frequenzinkrementen korrekt ermitteln kann. Als Datenbasis für die im nächsten Kapitel ausführlich beleuchtete FIR-Koeffizientenerzeugung werden FFT-Spektren benötigt, deren Länge so groß sein muß, daß sich auch am unteren Ende des Übertragungsbereichs eine zufriedenstellende Auflösung ergibt. Bedingt durch das konstante Frequenzinkrement ist die Auflösung im Hochtonbereich dann zumeist um ein Vielfaches höher, als es zur Charakterisierung des Hochtöners und zu dessen Entzerrung eigentlich notwendig wäre. Die Lautsprechermeßdateien belegen deshalb relativ viel Platz auf dem Massenspeichermedium des verwendeten Computers, was im Zeitalter der Gigabyte-Festplatten aber wohl nur noch eine untergeordnete Rolle spielt.

7.1 FFT-Meßverfahren

7.1.1 Impulse

Am einfachsten läßt sich die Messung an einem linearen, zeitinvarianten System (als welches Lautsprecher praktisch angesehen werden dürfen, so lange ihre Belastungsreserven nicht weitestgehendst ausgeschöpft werden) mit einem kurzen, diracförmigen Impuls durchführen. Die aufgefangene Antwort des Prüflings auf den einzeln ausgesendeten Impuls stellt schon direkt die gesuchte Impuls*antwort* dar, ohne daß dafür irgendwelche mathematischen Operationen durchgeführt werden müßten. Zur Bestimmung der Übertragungsfunktion ist nur eine einzige FFT erforderlich, womit die Impulsmessung von allen Verfahren den geringsten Rechenaufwand bedingt, wenn Impulsantwort *und* Spektrum dargestellt werden sollen..

Ein idealer Dirac-Impuls, wie ihn Mathematiker und Signaltheoretiker sicher gerne einmal zu Gesicht bekommen würden, ist unendlich schmal, hat aber den Flächen- bzw. Energieinhalt 1. Tatsächlich besteht an einem extrem kurzen, extrem hohen Impuls mit einem bis in den Mikrowellenbereich reichenden Spektrum aber natürlich zumindest in der Audiotechnik kein Interesse. Es ist lediglich gefordert, daß der Impuls im Auswertebereich einen hinreichend frequenzkonstanten Amplitudenverlauf besitzt. Wird zur Darstellung des Impulses ein moderner DA-Wandler eingesetzt, welcher mit mehrfachem Oversampling arbeitet, ist die Forderung nach Amplitudenkonstanz bis kurz vor der halben Abtastrate gut erfüllt. Der aperturbedingte sin(x)/x-Abfall (siehe Kapitel 1) macht sich dann kaum bemerkbar. Statt des Impulses wird aber dann selbstverständlich die Impulsantwort des Oversamplers (also eine bewertete und geeignet abgebrochene sin(x)/x Funktion) als Stimulus an die Außenwelt abgegeben. Als Meßergebnis erscheint diese mit der Impulsantwort des Prüflings gefaltet, was gelegentlich, insbesondere wegen der vorauseilenden „nichtkausalen“ Anteile der linearphasigen Oversampler-Tiefpässe, bei der Darstellung der Impulsantwort stören kann. In diesem Fall ist die (später beschriebene) Kompensation des Spektrums erforderlich, womit aber der Vorteil des besonders geringen Rechenaufwands dahin schmilzt, denn die gesuchte Impulsantwort ist nun erst nach dieser Korrektur im Frequenzbereich und einer anschließenden IFFT verfügbar.

Der größte Nachteil bei der Messung mit Impulsen ist deren mangelnder Energieinhalt. Die Dynamik reicht vor allem bei akustischen Messungen im tieffrequenten Bereich meistens nicht aus und läßt sich nur durch viele kohärente Mittlungen brauchbar verbessern. Andererseits läßt sich der Impuls praktisch immer mit der vollen Amplitude des nachgeschalteten Leistungsverstärkers in den Lautsprecher einspeisen, ohne daß er

diesem damit Schaden zufügen würde. Gerade empfindliche Kalottenhochtöner, die bei einer zugeführten Dauerleistung von 5 Watt vielfach schon das Zeitliche segnen, können problemlos mit mehr als hundert Watt Impulsleistung angeregt werden. Aufgrund der Massenträgheit sind erst bei extrem hohen Spannungsamplituden Nichtlinearitäten durch exzessive Membranauslenkung zu befürchten. Damit relativiert sich die mangelnde Dynamik gegenüber den später beschriebenen, alternativen Meßverfahren ein wenig. Hochtöner lassen sich in ruhiger Umgebung durchaus mit einem Impuls messen. Bei rein elektrischen oder gar rein digitalen Messungen reicht die Dynamik sowieso fast immer aus. Die Messung mit Impulsen ist beispielsweise bei der Abgleicharbeit mit einem Equalizer, bei der es auf eine schnelle und korrekte Aktualisierung des gemessenen und dargestellten Frequenzgangs ankommt, von Vorteil gegenüber den später beschriebenen Pseudorauschsignalen. Fällt eine Änderung der Filtereinstellungen, also eine *Zeitinvarianz*, in eine Meßperiode, so wird der angezeigte Frequenzgang bei Verwendung der später beschriebenen Pseudorauschsignale grob verfälscht, während sich die Messung mit Impulsen von solchen Änderungen weitestgehendst unbeeindruckt zeigt. Andererseits lassen sich die Auswirkungen von eventuell vorhandenen Nichtlinearitäten nicht von der Impulsantwort trennen.

7.1.2 Zweikanal FFT-Analyse

Ist eine höhere Meßdynamik gefordert, sind Anregungssignale, deren Energie über die gesamte Meßdauer gleichmäßig verteilt ist, besser geeignet. In früheren Zeiten kamen zu diesem Zweck vielfach Zweikanal-FFT-Analysatoren zum Einsatz, denen als Meßsignalquelle zumeist ein simpler analoger Rauschgenerator beistand. Dieser speist den ersten Kanal des Analysators, während der zweite mit dem vom Mikrophon aufgefangenen Lautsprechersignal versorgt wird. Der Quotient des zweiten zum ersten Spektrum ergibt dann das gesuchte Übertragungsverhalten, wobei sich aber gleich eine eklatante Schwäche des Verfahrens offenbart: Der Rauschgenerator mag zwar über lange Zeiträume gemittelt ein weißes Spektrum liefern, der einzelne für eine Messung verwendete Ausschnitt weist aber erhebliche Fluktuationen mit tiefen Einbrüchen auf. Bei diesen Frequenzen liefert die Spektrumsdivision willkürliche Werte. Vernünftige Ergebnisse lassen sich nur mit vielen Mittelungen, bei denen jeweils die Bereiche unzureichender Dynamik am besten unberücksichtigt bleiben, erzielen. Dies zieht die Messung weit über die physikalisch notwendige Dauer in die Länge. Andererseits ist als Pluspunkt zu verbuchen, daß beliebige Quellen, so z.B. auch Sprache und Musik, als Meßsignal verwendet werden können. Somit eignet sich das Verfahren gut zur unauffälligen Kontrolle des Frequenzgangs *während* Veranstaltungen und wird auch heute noch eingesetzt.

Zweikanal-FFT-Analysatoren der ersten Generationen waren große, schwere und vor allem teure Geräte mit speziell konstruierter, aufwendiger Signalverarbeitungshardware. Sie sind längst von den allgegenwärtigen PCs verdrängt worden, die mit ein wenig Zusatzhardware in Form einer AD/DA-Wandlerkarte diese Dinosaurier vollständig ersetzen können. Die Rechenleistung aktueller Computermodelle selbst der untersten Preisklasse reicht schon heutzutage aus, um FFTs mit einem Mehrfachen der für den Echtzeitbetrieb notwendigen Geschwindigkeit durchzuführen. Deren Genauigkeit ist bei Ausnutzung des 64-Bit-Fließkommaformats, welches alle marktgängigen Prozessoren zur Verfügung stellen, zudem viel höher als bei den mit beschränkter Wortbreite und zumeist im Festkommaformat arbeitenden Stand-Alone-Analysatoren. AD/DA-Wandlerbausteine für den Audiobereich sind heute preiswerte Massenware, die nur noch geringen externen Schaltungsaufwand erfordern und ausgezeichnete Störabstände und Linearität aufweisen können.

7.1.3 Deterministische Signale mit FFT-Blocklänge

Die Integration eines DA-Wandlers in ein Meßsystem bietet die wichtige Möglichkeit, Meßsignale per Software zu synthetisieren bzw. als Datei abzurufen. Dadurch wird der zweite FFT-Kanal obsolet, da das Anregungssignal deterministisch ist und sein Spektrum somit nur einmal berechnet zu werden braucht. Bei periodischer Wiederholung ist es diskret, wobei Amplitude und Phase jeder enthaltenen Frequenz völlig unabhängig eingestellt werden können. Auf diese Weise können beispielsweise beliebig gefärbte Rauschsignale aus vorgegebenen Amplitudenspektren generiert werden, indem sämtliche Phasen des Spektrums per Zufallsgenerator ausgewürfelt werden. Das Meßsignal erhält man dann direkt durch eine IFFT. Eine Optimierung des Crestfaktors, also der Leistung bei gegebener Maximalamplitude, läßt sich erzielen, wenn statt dessen dem Spektrum einer *Maximalfolge* die Phasen „entwendet“ werden. So lassen sich Meßsignale gewinnen, die den korrespondierenden Maximalfolgen in allen Eigenschaften sehr ähnlich sind, aber die vorteilhafte Länge 2^n besitzen.

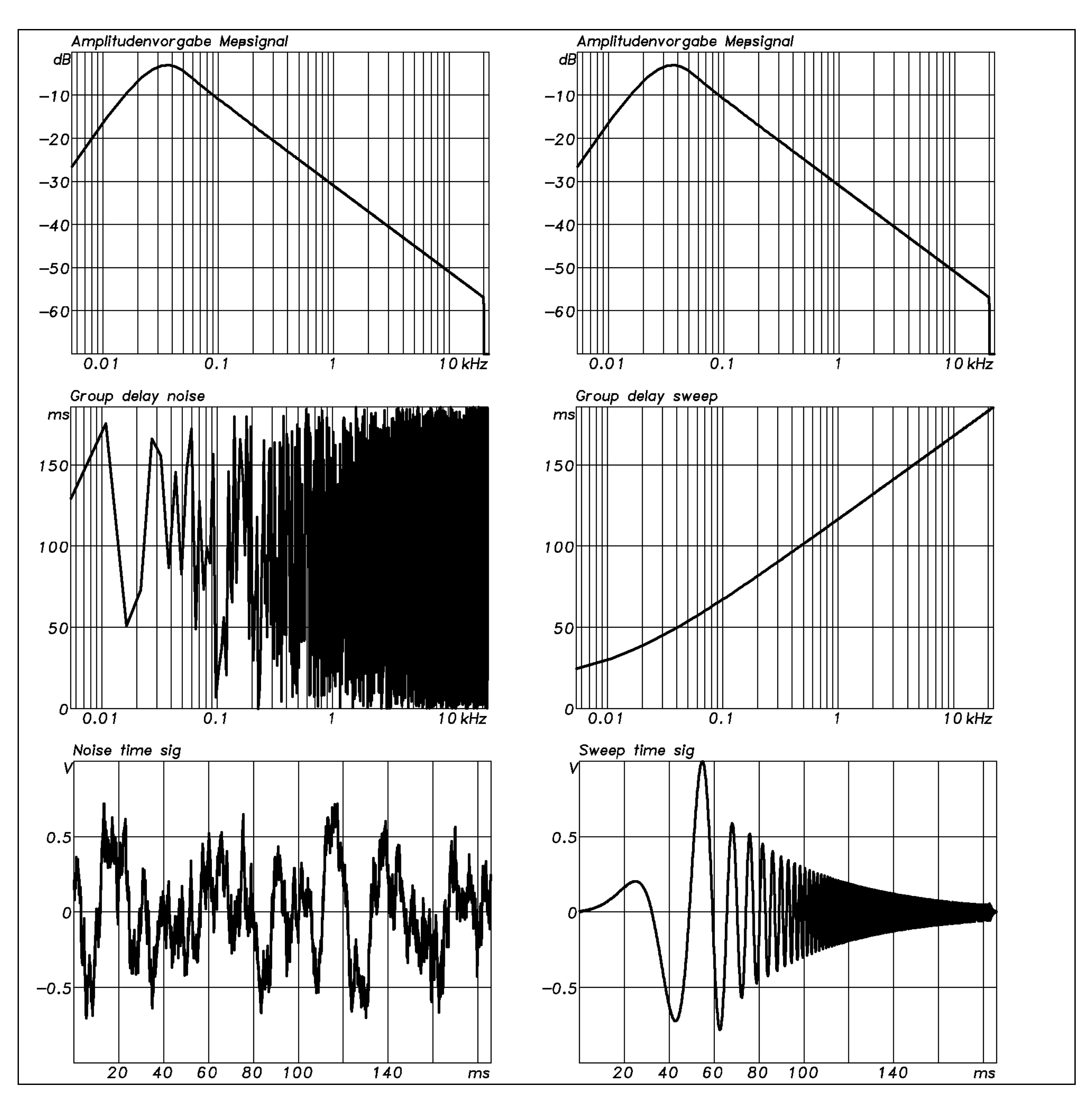


Abbildung 15: Oben: Gemeinsames Amplitudenspektrum (-6 dB/Oktave) für ein Rauschsignal und einen Sweep. Mitte: Gruppenlaufzeitspektren. Unten: Zeitsignale

Läßt man die Phase hingegen über der Frequenz mit einem bestimmten Inkrement fallen oder steigen, ergibt sich aus dem selben Amplitudenspektrum durch IFFT ein Sweep-Signal.

Die Sweepsignale mit Amplitudenspektrumsvorgabe gelingen besonders gut, wenn das Vorgabespektrum zunächst 0-phasig in den Zeitbereich transformiert und die symmetrische Impulsantwort dort mit einem Fenster, welches höchstens halb so breit wie der Zeitausschnitt ist, behandelt wird. Nach Rücktransformation in den Frequenzbereich kann der gewünschte Laufzeitverlauf aufgeprägt werden. Nach abschließender IFFT steht das Sweepsignal zur Verfügung, welches dank dieser Spezialbehandlung

überlappungsfrei ist. Soll ein Sweepsignal mit logarithmischem Frequenzinkrement einen konstanten zeitlichen Amplitudenverlauf aufweisen, so muß das Betragsspektrum mit 3 dB/Oktave fallen.

In Abbildung 15 sind zwei Signale, die aus dem selben Betragsspektrum hervorgegangen sind, zu sehen. Trotz identischer Leistung jeder enthaltenen Frequenz scheinen die korrespondierenden Zeitsignale auf den ersten Blick nichts gemein zu haben. Das gesuchte Übertragungsverhalten ergibt sich aus den Messungen, genau wie bei der Zweikanal-FFT-Analyse, durch Division des Ausgangsspektrums mit dem Spektrum des Anregungssignals. Im ungestörten Fall ergeben sich dabei die gleichen Resultate.

Dank der Möglichkeit, das Amplitudenspektrum und die Phase eines periodischen Meßsignals im Frequenzbereich frei und beliebig diktieren zu können, lassen sich per inverser diskreter Fouriertransformation praktisch beliebige Meßsignale beliebiger Längen erzeugen. Sind sie für die Auswertung mit Hilfe von FFTs bestimmt, die bekanntlich nur auf periodische Signale der Länge 2^n angewandt werden können, ist ihre Länge natürlich ebenfalls auf ganzzahlige Zweierpotenzen beschränkt. Dies stellt in der Praxis aber keine große Behinderung dar; reicht die Frequenzauflösung, die sich zu

$df = f_s/N$ f_s = Abtastrate N = Anzahl Abtastwerte

ergibt, nicht aus, so läßt sie sich eben durch Wahl der nächsthöheren Zweierpotenz verdoppeln. Pseudorauschsignale der FFT-typischen Länge von 2^n werden in letzter Zeit gerne in einigen FFT-basierten Meßsystemen eingesetzt. Sie kursieren unter dem etwas befremdlichen Namen „Multi-Sinus-Signal“, womit wohl zum Ausdruck gebracht werden soll, daß das periodische Meßsignal sich aus einer definierten Anzahl von Sinusschwingungen kontrollierter Amplitude und Phase zusammensetzt. Selbstverständlich gilt dies aber für *jedes* beliebige periodische Signal, natürlich auch für die später vorgestellten *Maximalfolgen*, zu denen die Multi-Sinus-Signale gerne in Kontrast gesetzt werden. Vorteilhaft für die Verwirklichung eines Meßsystems ist aber, daß die simple FFT des Ausgangssignals eines zu untersuchenden Systems, gefolgt von der Division durch das Anregungsspektrum, zur Ermittlung der Übertragungsfunktion ausreicht. Daraus läßt sich per IFFT die Impulsantwort gewinnen, in der bei Bedarf (der bei akustischen Messungen fast immer gegeben ist) Störungen und Reflexionen ausgefenstert werden können. Die so bereinigte Impulsantwort kann dann per FFT wieder in den Frequenzbereich überführt werden, womit die Anzahl der nötigen Transformationen für einen vollständigen Meßdurchlauf auf drei ansteigt. Der Rechenzeitbedarf ist damit in etwa doppelt so hoch wie beim vorgestellten Maximalfolgen-Meßverfahren, was aber angesichts der mittlerweile verfügbaren Rechenleistung aktueller Computermodelle nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Für

neu zu entwickelnde Meßsysteme hat der Einsatz von Maximalfolgen daher stark an Attraktivität eingebüßt.

7.2 Time Delay Spectrometry

Die TDS ist ein allmählich in die Jahre kommendes, aber vielfach noch gern genutztes Meßverfahren (jedenfalls sind einsatzbereite TDS-Analysatoren noch in vielen Lautsprecher-Entwicklungsabteilungen anzutreffen), welches mit *frequenzlinearen* Sweeps (*df/dt = const.*) *konstanter* Amplitude arbeitet und zur Ermittlung der Übertragungsfunktion *ohne* Fouriertransformation auskommt. Der TDS widmete Richard Heyser einen Großteil seiner Schaffenskraft. Das komplette, in der ursprünglichen Version vollständig analoge Verfahren läßt sich auch softwaretechnisch, womit - ebenso wie bei allen anderen in diesem Kapitel vorgestellten Meßverfahren - die vormals benötigte, aufwendige Hardware bis auf AD- und DA-Wandler eingespart werden kann.

Im Kern besteht ein TDS-System aus einem Sweep-Generator, der ein Sinus- sowie ein mit 90° Versatz phasenstarres Cosinus-Signal steigender Frequenz erzeugen kann. Eines dieser beiden Sweepsignale wird dem Prüfling zugeführt, dessen Antwort darauf jeweils mit *beiden* Signalkomponenten *multipliziert* wird. Das Ausgangssignal der Multiplikatoren wird tiefpassgefiltert und stellt dann schon Realteil (aus Multiplikation mit Sinus) und Imaginärteil (aus Multiplikation mit Cosinus) der gesuchten Übertragungsfunktion dar.

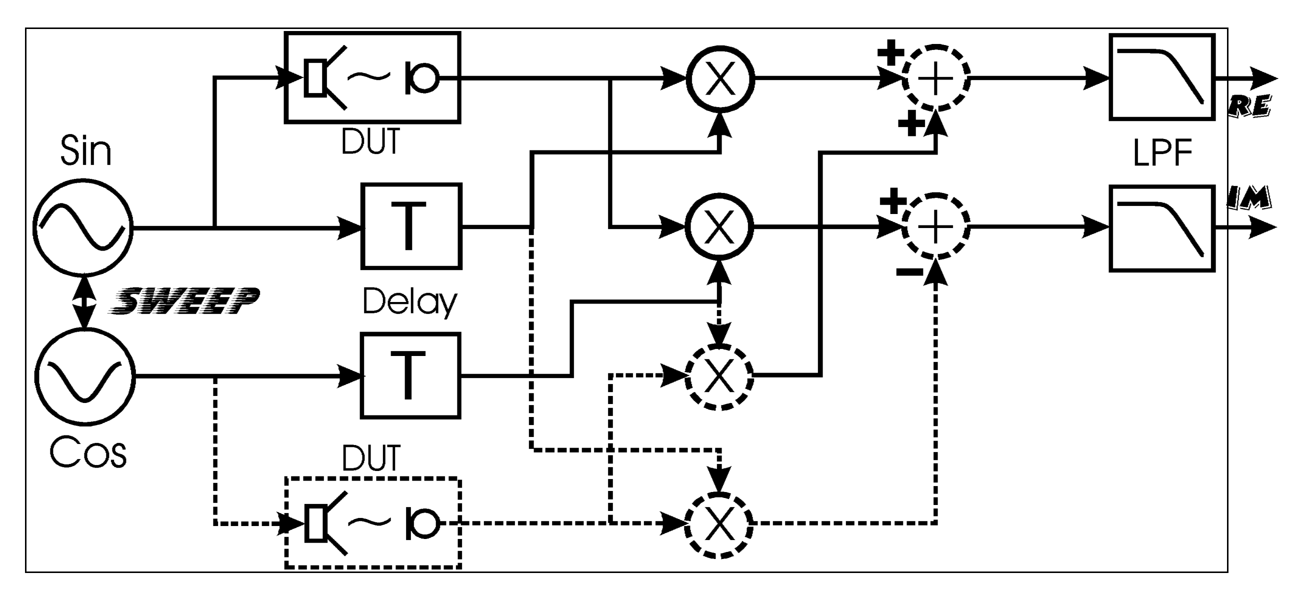


Abbildung 16 Prinzipielle Funktionsweise eines TDS-Meßsystems. Die gestrichelten Wege werden nur dann durchlaufen , wenn zwecks Eliminierung von Ripple im Tieffrequenten der später beschriebene zweite Meßdurchlauf mit dem cos-Signal als Anregung durchgeführt wird.

Bei Übereinstimmung der Frequenzen des Generators und des aufgefangenen Meßsignals bildet sich an den Demodulator-Ausgängen im zeitlichen Mittel ein Gleichanteil (wobei

die Aufteilung auf die beiden Ausgänge von der Phasenlage abhängig ist), der von den nachgeschalteten Tiefpassfiltern geglättet wird. Stimmen die Frequenzen hingegen nicht überein, weil das Meßsignal eine Verzögerung aufweist (wie dies bei akustischen Messungen ja praktisch immer der Fall ist), so bildet sich eine Schwebung aus der Frequenzdifferenz von aufgefangenem Meß- und dem Generatorsignal. Diese wird von den Tiefpassfiltern unterdrückt (vorausgesetzt, die Frequenz der Schwebung liegt deutlich über dessen Grenzfrequenz). Aus diesem Grund muß das Generatorsignal dem Demodulator um die Laufzeit der Meßstrecke *verzögert (time delayed)* zugeführt werden. Praktischerweise ergibt sich dadurch dann bei Lautsprechermessungen eine gute Unterdrückung von unerwünschten Reflexionen. Diese treffen ja unweigerlich verspätet ein und besitzen deshalb eine niedrigere Momentanfrequenz als der Direktschall. Sie bilden also mit dem Demodulationssignal wiederum eine Schwebung, die um so weniger Einfluß auf das Meßergebnis entfaltet, je größer der Laufzeit- und damit der Frequenzunterschied zum Direktschall ist.

Aus dem per TDS erhaltenem, aus Real- und Imaginärteil bestehenden komplexen Spektrum lassen sich alle üblichen Informationen wie Betrag, Phase, Laufzeit und Ortskurve sowie über eine normale inverse Fouriertransformation natürlich auch die Impulsantwort gewinnen. Bekannt sind die TDS-Analysatoren außerdem auch für die Darstellung der von Richard Heyser propagierten „Energie-Zeitkurve“ (ETC), die sich aus dem *Betrag* des komplexwertigen *analytischen Signals* ergibt und die *Hüllkurve* der Impulsantwort darstellt. Sie kann selbstverständlich unabhängig vom Meßverfahren stets berechnet werden, wann immer die Impulsantwort vorliegt.

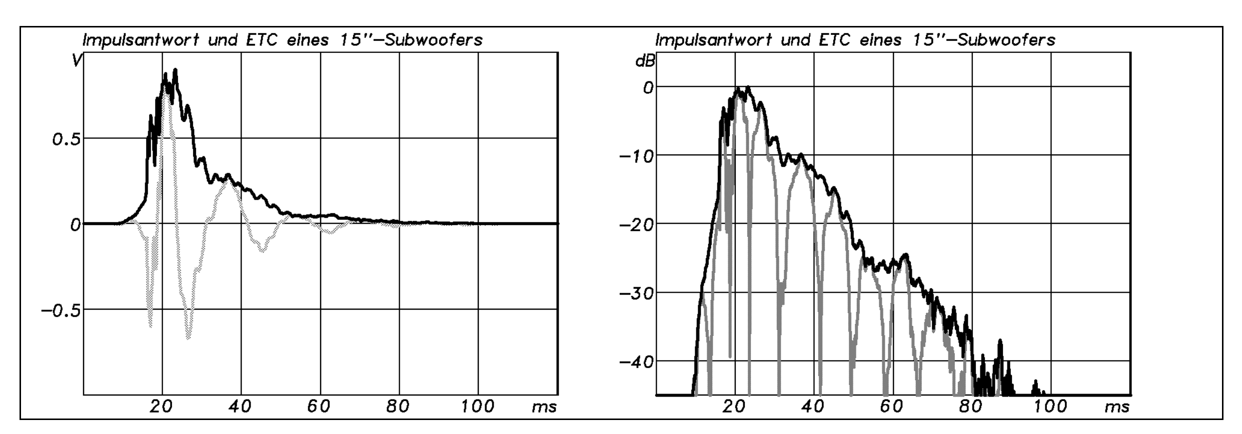


Abbildung 17: Impulsantwort (grau) und Energy Time Curve (schwarz) eines 15“-Bandpass-Subwoofers in linearer (links) und logarithmischer (rechts) Darstellung.

Das analytische Signal besteht aus einem *Realteil*, welcher die Impulsantwort höchstselbst ist, und einem *Imaginärteil*, der die um 90° phasenverschobene Version der

Impulsantwort darstellt. Er läßt sich durch FFT der Impulsantwort, 90° Phasenverschiebung aller Spektralwerte und abschließende IFFT gewinnen, wobei durch eine solche Manipulation des Spektrums unvermeidlich ist, daß der Imaginärteil des analytischen Signals nichtkausale Anteile enthält, also zu negativen Zeiten *nicht* verschwindet. Die ETC ist deshalb mit Vorsicht zu genießen, insbesondere, wenn sie als zeitlicher Verlauf des Energieflusses interpretiert werden soll. Aus ihr lassen sich aber Verzögerungszeiten und insbesondere das Ausklingen der Impulsantwort ganz gut ablesen, da die Nulldurchgänge der Impulsantwort durch die 90° phasenverschobene Komponente bei der Betragsbildung „aufgefüllt“ werden.

Anm.: *Die 90° Phasendrehung läßt sich leicht durch Negierung des Realteils und anschließendem Tausch mit dem Imaginärteil bewerkstelligen. Die Negierung läßt sich wiederum pfeilschnell durch schlichtes Invertieren des Vorzeichenbits der Fließkommazahlen (durch Addition von 128 auf das höchstwertige Byte) durchführen, so daß die Fließkommaeinheit für die gesamte Operation nicht einmal benötigt wird.*

Ein entscheidender Nachteil des TDS-Verfahrens ist die Benutzung frequenzlinearer Sweeps, was in den unteren Oktaven zu einem unzureichenden Energiegehalt des Meßsignals führt und die Messung in den oberen Oktaven über Gebühr in die Länge zieht. Zur optimalen Anpassung an jedwede Meßumgebung ist die freie Wahl der spektralen Leistungsverteilung eines Meßsignals, wie weiter oben vorgestellt, auf jeden Fall erstrebenswert. Immerhin läßt sich durch die einfache Wahl der Start- und Stopfrequenz des Sweeps der Auswertebereich bequem festlegen. Die Länge des Spektrums ist auch nicht auf FFT-typische 2^n Werte festgelegt, wenngleich dies zur Ermittlung der Impulsantwort per IFFT trotzdem praktisch ist. Wegen der schlechten spektralen Energieverteilung erscheint zur Ermittlung des breitbandigen Frequenzgangs eines Lautsprechers die (umständliche!) Messung in zwei Etappen mit Zerlegung in zwei Frequenzbereiche sinnvoll.

Weiterhin wird im Zusammenhang mit TDS-Messungen immer wieder von Schwierigkeiten an der unteren Bandgrenze berichtet. Dort ist ein oszillierender Verlauf des gemessenen Spektrums zu verzeichnen. Dieser erklärt sich zum einen aus der nachlassenden Glättungswirkung der Demodulator-Tiefpässe auf die quadrierte Momentanfrequenz. Zum anderen müssen sich die Tiefpässe nach dem plötzlich eingeschalteten Sweepsignal erst einschwingen. Gegen die nachlassende Glättungswirkung bietet sich die Herabsetzung der Tiefpass-Grenzfrequenz an. Zur Beibehaltung der gleichen Frequenzauflösung muß dann aber die Dauer des Sweeps proportional erhöht werden, da das Tiefpassfilter nun auf schnelle Fluktuationen träger reagiert.

Eine bessere Lösung ist eine Messung in *zwei* Durchläufen, bei der das Testobjekt zunächst mit dem normalen Sweep und dann mit dem 90° phasenverschobenen Abkömmling gespeist wird. Die Antwort des Testobjektes wird für beide Durchläufe mit den verzögerten, in 90° Phasenbeziehung stehenden Generatorsignalen multipliziert. Das Ergebnis beider Durchläufe wird addiert (im Imaginärzweig subtrahiert, siehe gestrichelte Linien in Abbildung 16) und dann erst den beiden Tiefpässen für Real- und Imaginärteil zugeführt. Da sich die Quadrate von Sinus und Cosinus zu 1 addieren, verschwinden die anregungsfrequenzbedingten Oszillationen. Die Grenzfrequenz der Tiefpässe kann somit wieder angehoben werden. Bei reflexions- und störungsfreier Umgebung dürfen die Filter sogar ganz weggelassen werden.

Dem Einschwingproblem beim plötzlichen Einschalten des Sweepsignals ist damit aber noch nicht der Garaus gemacht worden. Hier hilft man sich damit, das Sweepsignal und die anschließende Auswertung schon bei tieferen (eventuell auch „negativen“) Frequenzen beginnen zu lassen, die Tiefpass-Ausgangssignale aber erst ab einem bestimmten Zeitpunkt (und damit ab einer bestimmten Frequenz) für bahre Münze zu nehmen. Eleganter wäre zweifelsohne die Verwendung eines Sweepsignals wie in Abbildung 15, dessen Spektrum durch die weiche Hochpasscharakteristik und das sanfte Anschwingen auch bei *nichtperiodischer* Aussendung kaum Schmutzeffekte aufweist.

Im Vergleich zu den anderen Verfahren (MLS, 2^n Signale) weist TDS für die reine Frequenzgangsmessung nicht unerhebliche Nachteile auf. Die erforderliche Dauer für eine breitbandige Messung ist deutlich länger und die Auflösung durch die Demodulator-Tiefpässe eher beschränkt. Mancher treue Benutzer liebt aber gerade den dadurch hervorgerufenen Glättungseffekt auf die gemessenen Spektren, der sich aber selbstverständlich auch bei allen anderen Meßverfahren durch gleitende Mittelung oder Fensterung der Impulsantwort erreichen läßt. Die spektrale Energieverteilung der TDS-Chirps ist wie die weißen Rauschens ungünstig, insbesondere für akustische Messungen. Vor der Auswertung muß erst das Delay gefunden und korrekt eingestellt werden, während es bei den anderen Meßverfahren keine Schwierigkeit ist, durch Maximumssuche die Impulsantwort irgendwo im Auswertezeitraum aufzufinden und auszufenstern. Für störungsfreie Messungen bei tiefen Frequenzen muß die Messung mit dem 90° phasenverschobenen Signal wiederholt werden, womit der Vorteil der nur einmalig erforderlichen Aussendung des Anregungssignal verloren geht.

7.3 Störungen

Störungen der Messungen lassen Unterschiede bei der Verwendung verschiedener Meßsignale zu Tage treten. Für Abbildung 18 sind exemplarisch anhand eines Rausch- und eines Sweepsignals der Länge 2^n zwei häufige Störungsarten simuliert worden. Im ersten Beispiel verunziert ein kurzer, impulsartiger Peak in Form eines einzelnen falschen Abtastwerts das Meßsignal, während für das zweite Beispiel alle Abtastwerte mit dem Faktor 0,96 *potenziert* wurden. Dies entspricht Nichtlinearitäten in der Größenordnung von 1%, wie sie beispielsweise in ähnlicher Form in Verstärkerstufen bei nicht ausreichendem Ruhestrom als Übernahme-verzerrungen im Nulldurchgang auftreten können.

Die impulsartige Störung hat auf beide ermittelte Amplitudenspektren (die schon mit dem inversen Anregungsspektrum multipliziert wurden) makroskopisch gesehen praktisch die gleiche Auswirkung. Die per IFFT zu berechnenden Impulsantworten sehen, was ihren Störteppich angeht, allerdings sehr unterschiedlich aus. Die Störung erscheint dort mit der inversen Fouriertransformierten des inversen Anregungsspektrums gefaltet. Da die Störung hier ein Dirac-Impuls war, addiert sich also die Impulsantwort des spektral invertierten Anregungssignals selber zum Resultat.

Im Fall der simulierten Verzerrungen scheinen die Auswirkungen bei Messung mit dem Sweep-Signal etwas geringer zu sein, so daß Messungen bei dieser Art Verzerrung offenbar günstiger damit durchgeführt werden. In der korrespondierenden Impulsantwort sind interessante Phantom-Peaks zu bestaunen..

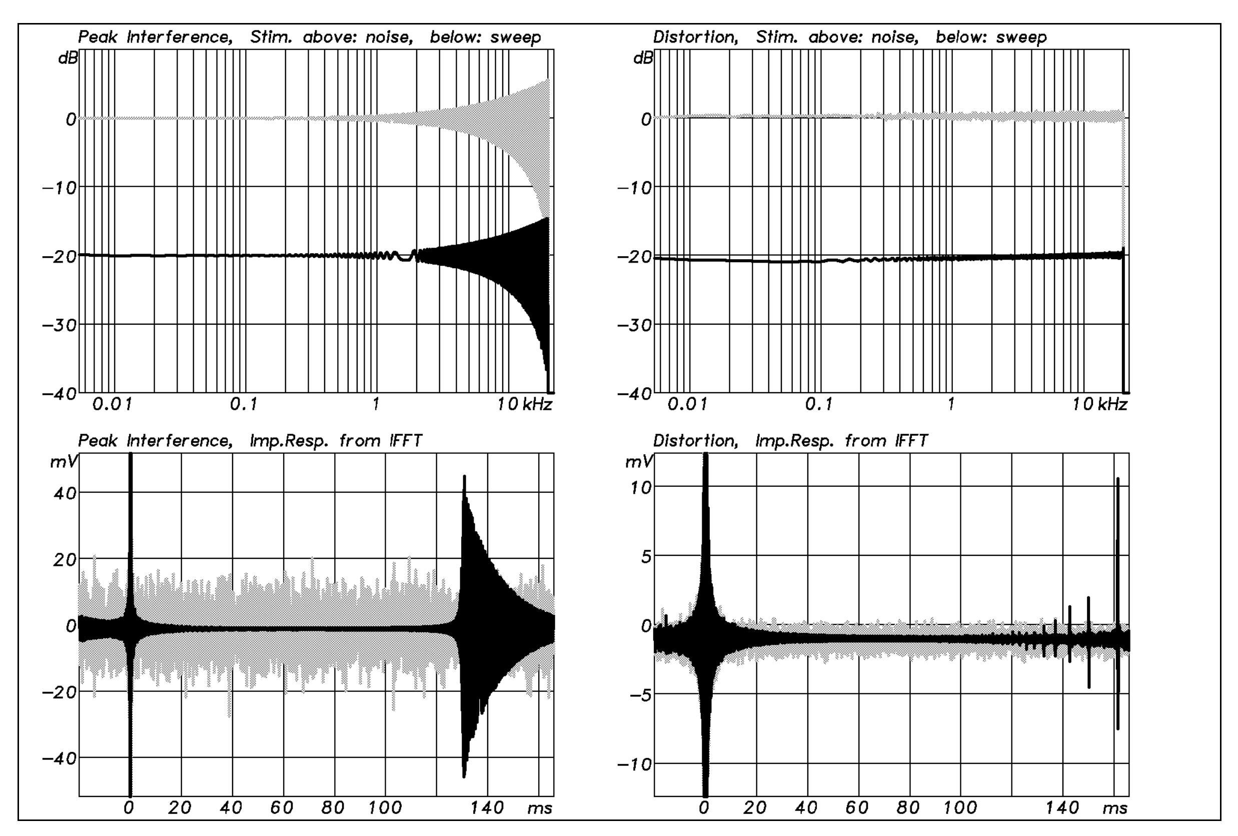


Abbildung 18: Gestörte Messungen und daraus gewonnene Impulsantworten. Links: Störung durch einzelnen Peak, rechts: Störung durch Verzerrungen (Potenzierung mit Faktor 0,96) Die Spektren aus den Sweep-Messungen sind zur besseren Übersicht 20 dB tiefer dargestellt. Die Impulsantworten (schwarz = Sweep) sind amplitudenmäßig vergrößert dargestellt, die Höhe des Hauptmaximums beträgt 1V.

Eine andere Klasse Störungen, mit der bei akustischen Messungen häufiger zu kämpfen ist, sind Zeitvarianzen. Diese können z.B. bei Messungen im Freien, insbesondere bei größerem Abstand des Meßmikrophons von der Schallquelle, durch Luftbewegung (Wind, Thermik) und die dadurch bedingte temporäre Änderung der Schallgeschwindigkeit ihren störenden Einfluß entfalten. Bei Messverfahren, für die zur Erzielung ausreichender Dynamik viele kohärente Mittlungen erforderlich sind, kann eine auch nur leichte Temperaturänderung über die dann erfolgende Änderung der Schallgeschwindigkeit erhebliche Störungen verursachen.

Zeitvariant kann sich auch der untersuchte Lautsprecher selber verhalten, wenn nämlich durch die Messung so viel Leistung in seine Schwingspule eingespeist wird, daß sich diese merklich erhitzt. Der Effekt kann besonders deutlich werden, wenn das Chassis über eine passive Weiche betrieben wird. In diesem Fall führt die sich erhöhende Schwingspulenimpedanz nicht nur zu einem breitbandigen Empfindlichkeitsverlust, sondern durch die geänderte Abschlußimpedanz auch zu lokalen Änderungen des

Frequenzgangsverlaufs. Solche Änderungen ergeben sich aber zumeist allmählich (wenn die eingespeiste Leistung nicht *viel zu* groß ist), so daß die Zeitvarianz *innerhalb* einer Messung eher gering ausfällt.

Störender sind schnelle Zeitvarianzen, die in einzelne Perioden des Meßsignals fallen. Hier ergeben sich je nach Zeitabhängigkeit der Störung bedeutsame Unterschiede für die verschiedenen Meßsignale. Um die Auswirkung der Zeitvarianzen auf die beiden schon vorgestellten Meßsignale zu demonstrieren, wurden zwei verschiedene „Zeitvarianz-Signale“, welche die Abweichung jedes Abtatstzeitpunktes repräsentieren, generiert. Das erste ist ein dreiecksverteiltes weißes Rauschen mit einer Amplitude von ±0,5 Samples und stellt sicher ein recht übertriebenes Szenario dar. Das zweite Signal besitzt die gleiche Abweichung von maximal einem halben Sample, gehorcht aber dem sanften Verlauf einer Sinusschwingung.

Zur Simulation der Schwankung der Abtastzeitpunkte wurde die Abtastrate der beiden Meßsignale zunächst auf das 256-fache heraufgesetzt, indem zwischen 2 Abtastwerten jeweils 255 Nullen eingefügt wurden. Die Abtastzeitpunkte wurden nun gemäß der künstlichen Zeitvarianz-Kurven, die zu diesem Zweck auf den Wertebereich ±128 normiert wurden, verschoben. Das resultierende „verjitterte“ Signal mußte nun einen steilflankigen Tiefpass mit 21 kHz Grenzfrequenz passieren und wurde dann um den Faktor 256 unterabgetastet, um wieder zur ursprünglichen Abtastrate von 44,1 kHz zu gelangen. Diese letzten beiden Schritte sind zur Auswertung nicht unbedingt erforderlich, dämmen aber die Datenflut auf der Festplatte ein. Zur Vermeidung von Randeffekten wurden alle Schritte auf drei aufeinanderfolgende Perioden des Meßsignals angewandt, von denen dann nur die mittlere ausgewertet wurde.

Recht aufschlußreich sind die Resultate der Simulation, die sich in Abbildung 19 präsentieren. Die Störung der Abtastzeitpunkte durch weißes Rauschen, wie sie auf der linken Seite dargestellt ist, wirkt sich auf das Noise- und das Sweepsignal praktisch gleich aus. Die für die Simulation gewählte Jitter-Amplitude von ±0,5 Abtastwerten ist so heftig, daß sich die Messung nur im Bereich unterhalb 1 kHz wiedererkennen läßt. Ganz anders sieht es aber bei der tieffrequenten sinusförmigen Störung der Abtastzeitpunkte aus: Während die Messung mit dem Noise-Signal darunter ebenfalls erheblich leidet, zeigt sich die Messung mit dem Sweep-Signal nahezu immun gegen diesen Einfluß! Die im Meßalltag auftretenden Zeitvarianzen werden in aller Regel eher tieffrequenter Natur sein, so daß der Sinusverlauf vermutlich repräsentativer für die tatsächlich zu erwartenden Störungen ist. Damit läßt sich als Fazit eine eindeutige Empfehlung für die Verwendung von Sweep-Signalen aussprechen, so bald Zeitvarianzen zu befürchten sind (z.B. bei analogen Recordern oder Messung der Lautsprecheranlagen bei großen Open Air Veranstaltungen).

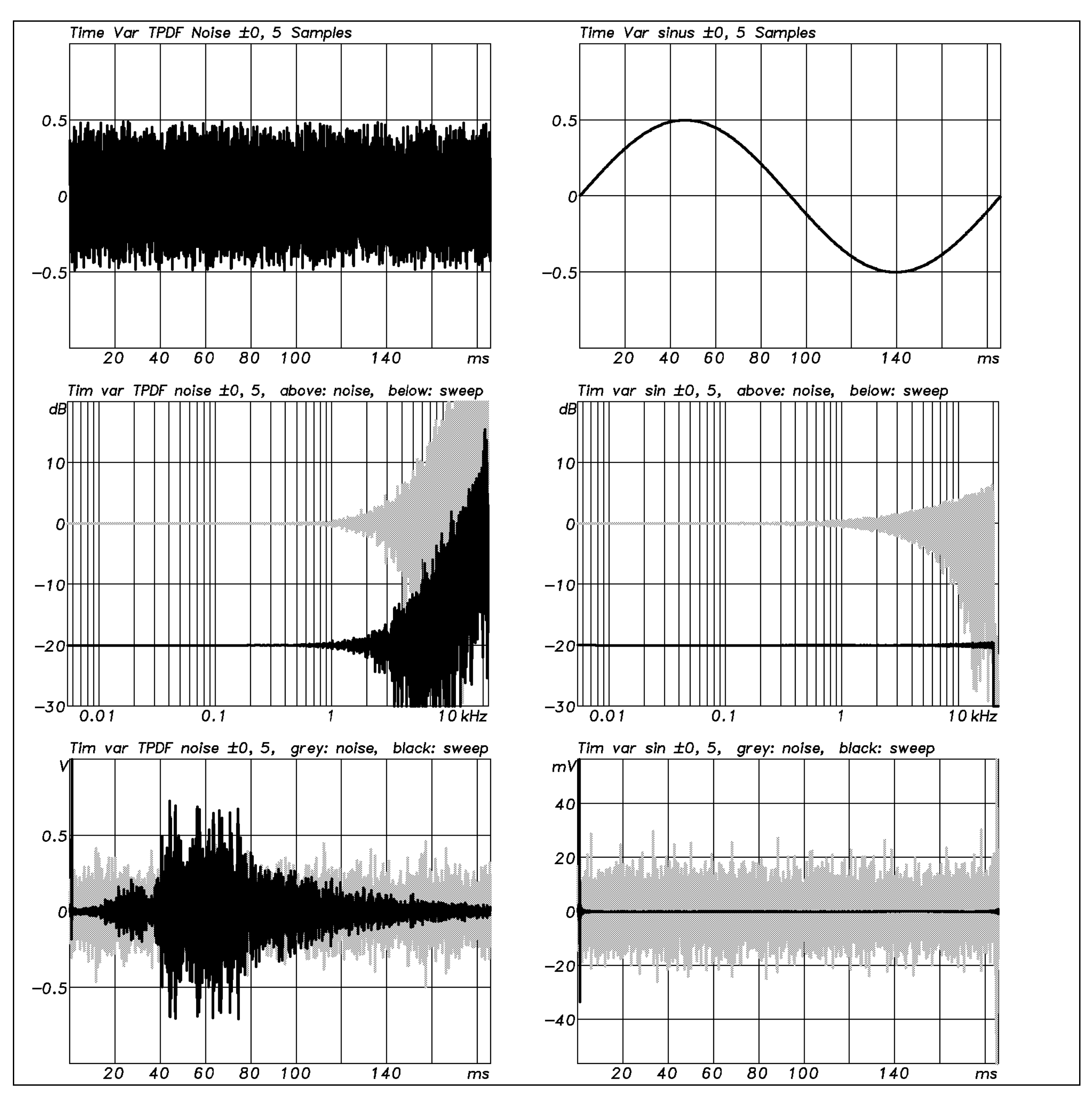


Abbildung 19: Durch Zeitvarianzen gestörte Messungen und daraus gewonnene Impulsantworten Oben: Zeitvarianzverläufe für die Simulation, Mitte: Übertragungsfunktionen aus Messung, im oberen Teil aus dem Noise-Signal (grau) und 20 dB tiefer aus dem Sweep (schwarz).
Unten. Impulsantworten aus IFFT (Hauptmaximum= 1V)

7.4 Maximalfolgen

Neben den frei komponierbaren FFT-Meßsignalen der Länge 2^n, seien dies nun Rausch- Sweep- oder beliebige sonstige Signale mit adäquater Energieverteilung, sind auch die sogenannten *Korrelationssignale* sehr gut für Meßzwecke geeignet. Diese Signale haben eine Autokorrelationsfunktion, die dem Ideal eines einzelnen Diracimpulses möglichst nahe kommt. Diese Bedingung läßt sich am einfachsten für periodisch wiederholte Sequenzen erfüllen, die hier sowieso ausschließlich betrachtet werden. Die periodische AKF (PAKF) einer *perfekten Folge* verschwindet bis auf einen Hauptwert (pro Folgenlänge) überall.. Damit steht auch fest, daß alle Frequenzen des zugehörigen diskreten Spektrums die gleiche Amplitude besitzen, das Spektrum also weiß ist, wie sich unschwer mit dem Wiener-Khintchine-Theorem zeigen läßt:

$$j_{SS}(m) = Ed(m) \quad \circ\!\!-\!\!\!-\!\!\bullet \quad |S(f)|^2 = E$$

Perfekte Folgen (mit zu Meßzwecken ausreichender Länge) müssen mindestens drei verschiedene Amplitudenzustände annehmen. Binärwertige perfekte Folgen wurden jedenfalls (bis auf ein Exemplar mit nur 4 Werten) noch nicht entdeckt. Für viele Anwendungen, so auch die Meßtechnik, reichen aber auch Folgen aus, welche die Bedingung einer perfekten PAKF nur näherungsweise erfüllen. Zur Charakterisierung der Korrelationseigenschaften bedient man sich zweier Gütemaße. Das erste beschreibt das Verhältnis des Hauptmaximums zum betragsgrößten Nebenmaximum der PAKF:

$$HNV = \frac{j_{SS}(0)}{\max|j_{SS}(m)|}$$

Das zweite Maß, der sogenannte Merit-Faktor, gibt das Verhältnis der Energie im Hauptmaximum zur Energie der restlichen Werte der PAKF an:

$$MF = \frac{j^2{}_{SS}(0)}{\sum_{m=1}^{N-1} j^2{}_{SS}(m)}$$

Je mehr sich das Haupt-Nebenmaximumverhältnis und der Merit-Faktor dem Unendlichen nähern, desto weißer ist das Spektrum der untersuchten Folge. Einen umfassenden Überblick über Kreation und Anwendung der verschiedensten Korrelationssignale, auch komplexwertiger oder sogar mehrdimensionaler Arrays, bietet.

Wie lassen sich nun Korrelationssignale in der Meßtechnik anwenden? Bildet man die *Kreuzkorrelation* zwischen einem solchen Signal und der Antwort eines LTI-Systems

darauf, so erhält man in guter Näherung (die Näherung ist um so besser, je idealer das verwendete Signal im Sinne einer perfekten PAKF ist) die gesuchte Impulsantwort des Systems (aus der sich, wie gewohnt, durch FFT der Frequenzgang gewinnen läßt) Nun ist eine Kreuzkorrelation für übliche Meßsignallängen allerdings mit erheblichem Rechenaufwand verbunden, wenn sie diskret im Zeitbereich ausgeführt werden soll.

Zum Glück gibt es aber eine Klasse pseudostochastischer, binärwertiger Signale mit günstigen Autokorrelationseigenschaften, die sich sehr einfach erzeugen lassen und für die ein hocheffizienter Kreuzkorrelationsalgorithmus existiert: die prominenten *Maximalfolgen* (MLS).

Maximalfolgen lassen sich durch Schieberegister, von denen zwei bis vier bestimmte Stufen über ein XOR-Gatter an den Eingang zurückgeführt werden, generieren. Dies ist sowohl mit simpler Hardware als auch durch kompakte Softwareroutinen möglich. Die „Anzapfungen“ des Schieberegisters für die XOR-gekoppelte Rückführung auf den Eingang lassen sich nun anhand der (eigentlich zu unrecht verunglimpften) „primitiven Polynome“ so wählen, daß *sämtliche* möglichen Zustände des Schieberegisters (mit Ausnahme von „alles 0“, zirkuliert kein einziges gesetztes Bit mehr im Register, so ist sein Innenleben erloschen) durchlaufen werden, ehe man wieder am Ausgangszustand angelangt. Dieser Eigenschaft verdanken die Maximalfolgen ihren Namen: Sie besitzen bei gegebener Anzahl von Schieberegisterstufen die *maximal* mögliche Periodenlänge. Mit einem n-stufigen Register lassen sich 2^n verschiedene Zahlen darstellen. Zieht man die verbotene 0 ab, so gelangt man zur maximalfolgentypischen Länge von 2^n-1 Werten. Die Maximalfolge setzt sich nun aber nicht aus den vollständigen Registerzuständen zusammen, sondern nur aus den aus der letzten Stufe „heraussprudelnden“ Bits. Reiht man diese über alle 2^n-1 Zustände aneinander, erhält man die gewünschte Folge, die folglich nur die Werte 0 und 1 beinhaltet und deshalb binärwertig ist.

Zur Aufbereitung als Meßsignal für die Elektroakustik muß die Folge auf eine passende Amplitude gebracht und durch Subtraktion der halben Amplitude gleichanteilfrei gemacht werden. Dadurch ergibt sich ein Signal, welches bei vorgegebener Maximalamplitude die *größtmögliche* Energie beinhaltet, denn alle Werte erreichen betragsmäßig die Maximalamplitude. Der Crestfaktor (das Verhältnis von Peak- zur Durchschnittsleistung) liegt somit bei unübertreffbaren 0 dB. Der hohe Energieinhalt der binärwertigen Sequenzen wird häufig als immenser Vorteil gegenüber allen anderen Meßsignalen hingestellt, erlaubt er theoretisch doch bei gleicher Aussteuerungsgrenze das Erzielen einer höheren Meßdynamik. Bei näherem Hinsehen entpuppt sich dieser vermeintliche Vorteil jedoch als nicht stichhaltig, denn das stets erforderliche Anti-Aliasing-Filter eines DA-Wandlers macht einen Strich durch die Rechnung. Moderne DA-Wandler arbeiten heute (unabhängig vom Umsetzerprinzip) allesamt mit vielfachem Oversampling, um die

Anforderungen an das nachgeschaltete analoge Anti-Aliasingfilter gering zu halten. Das Oversampling wird durch Überabtastung und steilflankige linearphasige Digitalfilter bewerkstelligt, die den gesamten Audiobereich mit verschwindend (und für ein Analogfilter höherer Ordnung unerreichbar) geringen Amplitudenschwankungen passieren lassen, um dann kurz vor der Nyquistfrequenz eine steile Tiefpaßwirkung zu entfalten. Die steilflankige Natur der Filter bewirkt nun ein heftiges Überschwingen bei steilen Signalsprüngen, wie sie in der Maximalfolge bekanntlich in Reinkultur vorkommen.

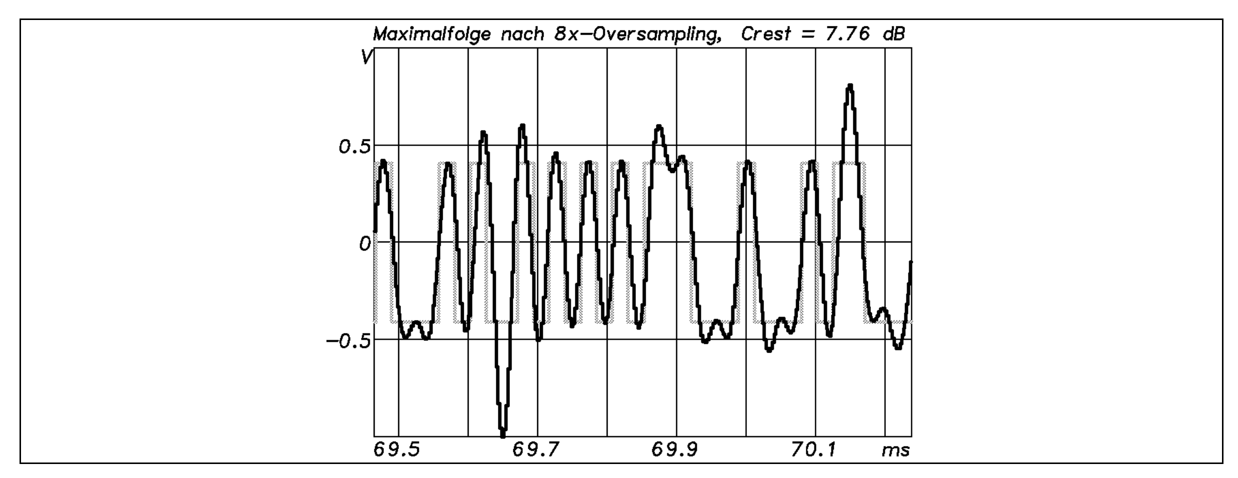


Abbildung 20: Wirkung (schwarz) eines typischen Achtfach-Oversamplingfilters auf eine Maximalfolge (grau). Der Crestfaktor verschlechtert sich durch die Tiefpassfilterung von 0 dB auf 7,76 dB. Die Maximalfolge darf somit nur mit knapp 41% der Vollaussteuerungs-Amplitude eingespeist werden

Dies hat zur Konsequenz, daß die Maximalfolge nur mit einem Pegel deutlich unterhalb der Vollaussteuerung eingespeist werden darf, um harte Clipverzerrungen und eine damit verbundene deutliche Beeinträchtigung der Meßergebnisse zu vermeiden. In der Praxis muß der Pegel einer Maximalfolge unterhalb von –8 dBFS bleiben, um solche Störungen, die sich durch Phantompeaks in der Impulsantwort und einen buschigen Verlauf des daraus abgeleiteten Spektrums schnell verraten, zu umgehen. Die Maximalfolge darf das Meßsystem also schon gar nicht mit vollem Pegel verlassen. Der tolerierbare Pegel einer Maximalfolge liegt kaum noch über dem eines echten stochastischen Rauschsignals, für das mindestens 11 dB Headroom relativ zum RMS-Pegel zu veranschlagen sind. Ein Sweepsignal mit frequenzkonstanter Amplitude (Crestfaktor: 3 dB) läßt sich hingegen problemlos bis zur Vollaussteuerung einspeisen und besitzt dann immerhin einen um 5 dB höheren Energieinhalt! Allerdings muß bei schmalbandigen Resonanzen des Prüflings die Amplitude eventuell doch herabgesetzt werden, um Übersteuerungen beim Durchschreiten der Resonanz zu vermeiden.

Ohnehin ist es nur ganz selten so, daß der Aussteuerungsbereich von Signalverarbeitungsstufen und Verstärkern überhaupt ausgenutzt werden kann oder muß. Bei Lautsprechermessungen stellt in aller Regel die Belastbarkeit der Chassis oder der anwesenden Menschen ein streng zu überwachendes Limit dar. Für diese und viele andere akustische Messungen ist zudem das weiße Amplitudenspektrum der Korrelationssignale keineswegs optimal. Bei rein elektrischen Messungen liegt der Störabstand normalerweise erheblich über dem akustischer Meßaufbauten, weshalb dort fast immer recht großzügig Pegel verschenkt werden darf, ohne daß die Meßergebnisse durch einsetzendes Rauschen beeinträchtigt werden. Der optimale Crestfaktor der ungefilterten Maximalfolgen ist insofern im Meßalltag ohne Relevanz.

Speist man nun ein LTI-System, welches die Stoßantwort *h(t)* besitzt, mit einer periodisch wiederholten Maximalfolge *m'(t)*, so läßt sich an dessen Ausgang, wie schon erwähnt, das Faltungsprodukt der periodisch wiederholten Maximalfolge mit der Impulsantwort des Systems beobachten: $g'(t) = m'(t) * h(t)$

Durch Faltung des Ausgangssignals *g'(t)* mit der zeitinversen Maximalfolge *m'(-t)* ergibt sich die periodisch wiederholte Impulsantwort des LTI-Systems:

$$g'(t) * m'(-t) = h(t) * m'(t) * m'(-t) = h'(t)$$

Ist sie innerhalb einer Periode unter die Auflösungsgrenze abgeklungen, so entspricht sie der gesuchten nichtperiodischen Impulsantwort *h(t)* des Systems.

Die Störanfälligkeit der Maximalfolgenmessungen ist ähnlich hoch wie bei der Verwendung der 2^n- Pseudonoise-Signale. Insbesondere treffen auch niederfrequente Verschiebungen der Abtastzeitpunkte die MLS-Messung empfindlich (Abbildung 21). Wenn widrige Meßbedingungen größere Zeitvarianzen erwarten lassen, sei auch hier der Umstieg auf die robusteren Sweepsignale empfohlen.

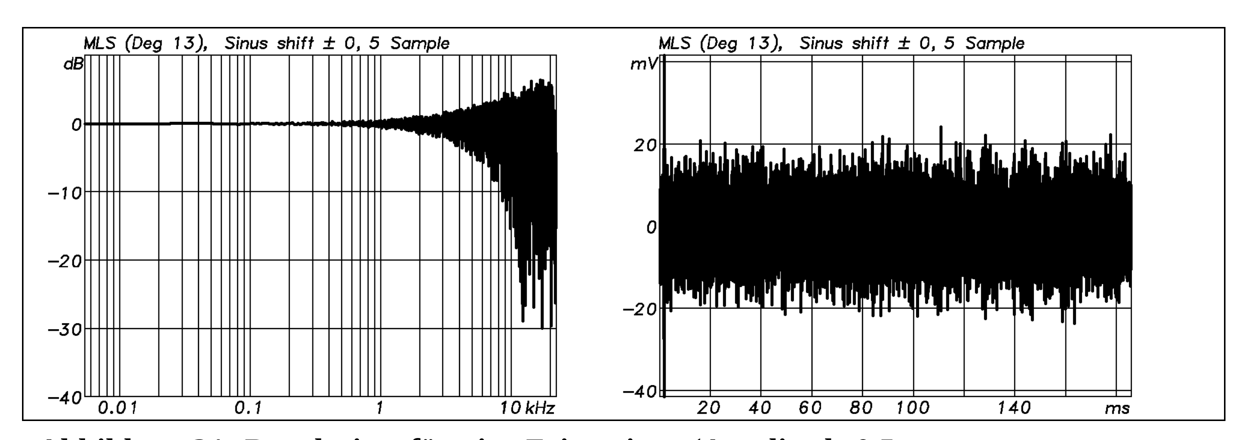


Abbildung 21: Durch sinusförmige Zeitvarianz (Amplitude 0,5 Samples, vgl. Abbildung 19) gestörte Messung mit

linearer MLS. Links: Spektrum, rechts: Impulsantwort daraus (Peak = 1V)

7.5 Färbung des Meßsignals

Unabhängig von der Wahl des Meßverfahrens muß die spektrale Beschaffenheit des Meßsignals einige Bedingungen erfüllen. Als erstes ist natürlich die Forderung zu stellen, daß alle interessierenden Frequenzen mit ausreichendem Pegel vorhanden sind, um dem zersetzenden Einfluß von Störungen akustischer oder elektrischer Natur wirkungsvoll zu begegnen. Die zweite wichtige Forderung ist, daß die Amplitudenunterschiede benachbarter Frequenzkomponenten nicht zu hoch ausfallen. Die stets mehr oder weniger stark vorhandenen Nichtlinearitäten des Prüflings hätten sonst zur Folge, daß im Anregungssignal nur schwach vorhandene Frequenzen durch Intermodulationsprodukte überdeckt werden, was die Messung bereichsweise unbrauchbar machen würde. Diese Tatsache gilt es besonders zu beachten, wenn als Meßsignal das darzubietende Audiosignal selber benutzt wird. Dabei ist zumeist die Auswertung etlicher Ausschnitte notwendig, bis sämtliche Spektralbereiche mit ausreichender Sicherheit erfaßt worden sind.

Weiterhin hat sich die spektrale Verteilung des Meßsignals den Belastungsgrenzen sowohl des untersuchten Lautsprechers als auch anwesender Personen zu unterwerfen. Für eine breitbandige Messung eines kompletten Lautsprechersystems (notwendig z.B. nach der Entzerrung zur Verifikation) ist ein weißes Spektrum, wie es beispielsweise ungefilterte Maximalfolgen oder TDS-Sweeps besitzen, *denkbar* ungeeignet. Durch den konstanten Energie/Bandbreite-Verlauf hat bei einer Trennfrequenz von 3 kHz und einer Abtastrate von 44,1 kHz der Hochtöner beispielsweise über 85% der eingespeisten Leistung zu schlucken, während er in Gestalt eines empfindlichen Kalottenlautsprechers einer Hifibox vielleicht nur 5% der Nennlast verträgt. Druckkammertreiber für PA-Lautsprecher sind robuster, wegen ihres sehr hohen Wirkungsgrades stellt die Verwendung eines Meßsignals mit weißem Spektrum aber eine *ernstzunehmende* Gefahr für in der Nähe verweilende Menschen dar, wenn es versehentlich mit viel zu hohem Pegel zur Aussendung gelangt.

Das Störspektrum akustischer Immissionen nimmt in aller Regel zu tiefen Frequenzen hin deutlich zu, während der Testlautsprecher unterhalb seiner Grenzfrequenz natürlich ausgerechnet in diesem Bereich eine Verringerung des abgestrahlten Schalldrucks mit 12 oder 24 dB/Oktave aufweist. Für einen bis vielleicht 100 Hz hinauf betriebenen Subwoofer würde bei Speisung mit einem weißen Testsignal nicht mal ein halbes Prozent der zugeführten Leistung abfallen. Dringend geboten ist also zumindest für breitbandige Messungen eine deutliche Anhebung der tieffrequenten Anteile. Diese Anhebung läßt sich im gemessenen Ergebnis bequem durch Division durch das Spektrum des Meßsignals wieder kompensieren. Auch von der psychologischen Seite her ist die

Benutzung eines Testsignals mit Tiefenanhebung vorteilhaft. Es wird als wärmer und angenehmer empfunden als das harsch und kalt klingende weiße Rauschen. Zudem fällt die Empfindlichkeit des Ohres im tieffrequenten Bereich deutlich geringer aus, so daß belästigende Pegel dort kaum zu befürchten sind.

Ein erster Schritt zur Dämpfung der höherfrequenten Anteile einer Maximalfolge läßt sich mit der weiter oben schon kurz angedeuteten Verwertung der *vollständigen* Schieberegisterzustände anstelle der üblichen Auskopplung des jeweils letzten Bits erreichen. Die daraus hervorgehenden Signale sind selbstverständlich nicht mehr binärwertig, sondern jeder Amplitudenwert zwischen 1 und 2^n-1 (n = Stufenzahl des Registers) kommt genau einmal vor. Das nun also „m-näre“ (m = Länge der MLS) Signal ist allerdings irgendwie eng mit der ursprünglichen binären Maximalfolge verknüpft, und spaßigerweise läßt sich die Hadamardtransformation auch ohne weiters darauf anwenden.

Durch die Kreuzkorrelation manifestiert sich eine Impulsantwort, die stark an einen einfachen RC-Tiefpass erinnert und auch einen ganz ähnlichen spektralen Verlauf mit sich bringt (Abbildung 22). Die Spitze der Impulsantwort rutscht im Vergleich zur Kreuzkorrelation mit der richtigen Maximalfolge allerdings um *n* (Registerstufenzahl) Werte zu früheren Zeiten, befindet sich also im entsprechenden Abstand links vom *rechten* Rand der PKKF. Durch einfache zyklische Vertauschung um *n* Werte läßt sie sich an die übliche Startposition bei t=0 bringen. Der spektrale Verlauf dieser nicht mehr weißen MLS ist für alle Folgenlängen gleich. Er hilft allerdings noch nicht richtig weiter, da die Höhenabsenkung erst bei hohen Frequenzen einsetzt und eigentlich auch noch zu moderat ausfällt. Die Besonderheit dieser abgewandelten MLS liegt aber darin, daß sie sich direkt und praktisch ohne zusätzlichen Aufwand aus dem Schieberegister-Algorithmus heraus erzeugen lassen. Deshalb wurde sie hier kurz vorgestellt.

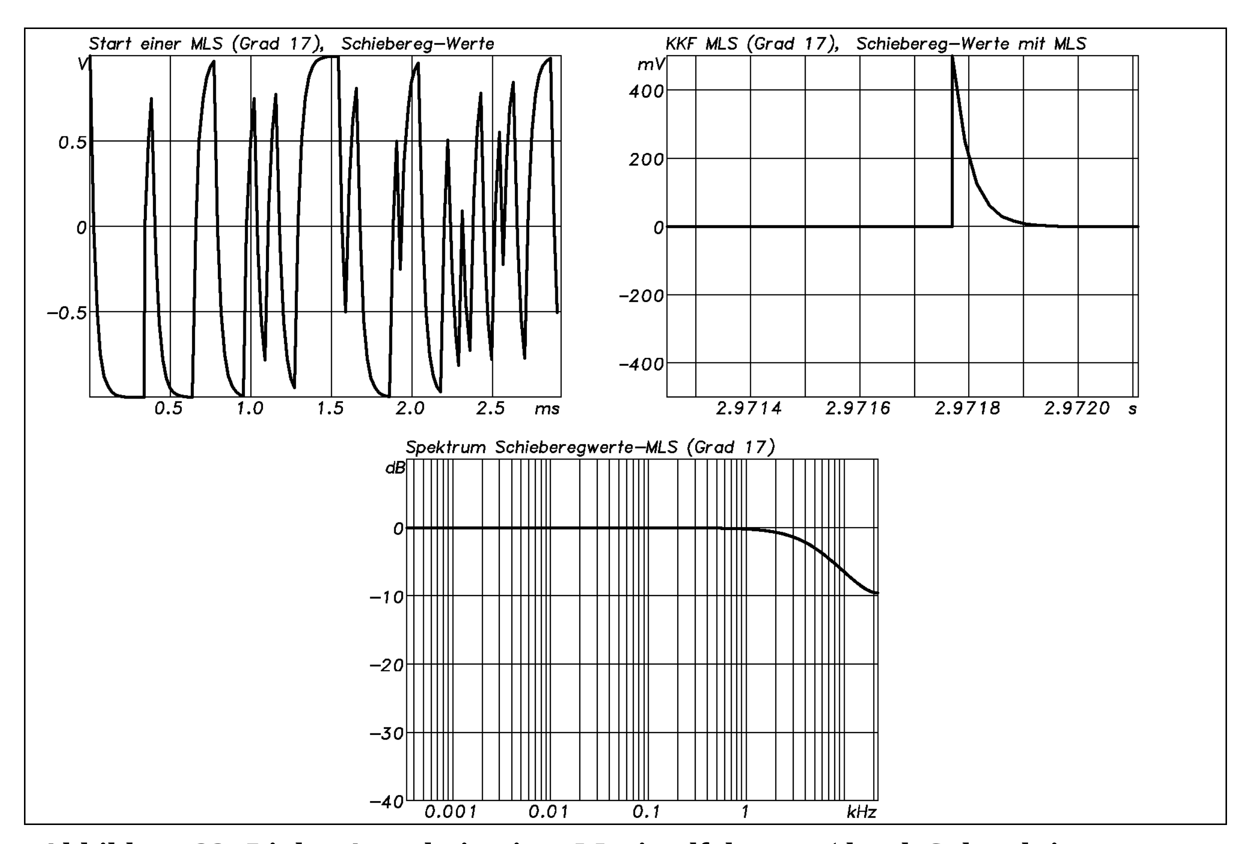


Abbildung 22: Links: Ausschnitt einer Maximalfolge aus (durch Subtraktion der halben Folgenlänge gleichanteilfrei gemachten) Schieberegister-Zahlenwerten. Rechts: Durch Hadamardtransformation erhaltene Kreuzkorrelation mit der normalen binären Maximalfolge (rechter Rand der PKKF) Eine binärwertige MLS gleicher Amplitude würde einen 1V hohen Peak in der KKF verursachen. Unten: zugehöriges Spektrum, 0 dB = Pegel der normalen MLS

Eine *beliebige* spektrale Färbung ist aber natürlich wünschenswerter und läßt sich durch Faltung der periodischen MLS mit der Impulsantwort des gewünschten Färbungsfilters erreichen. Ist diese Impulsantwort sehr kurz, so läßt sich die Faltung am schnellsten diskret im Zeitbereich ausführen. Längere Impulsantworten können über die schnelle segmentierte Faltung im Spektralbereich benutzt werden. Erfreulicherweise gibt es für die Faltung mit Maximalfolgen aber ein noch viel schnelleres Verfahren, nämlich die *inverse* Hadamardtransformation nach Eckard Mommertz. Ausgangspunkt ist die Impulsantwort *h(t)* des gewünschten Färbungsfilters, welche schon auf die Länge der Maximalfolge gebracht worden sein muß. Deshalb sollte es mindestens innerhalb einer Periode der MLS, besser aber schon viel eher ausgeklungen sein. Ist die Impulsantwort nicht symmetrisch, muß sie nun zunächst gespiegelt, also zeitinvertiert werden. Auf diese umgedrehte Impulsantwort wird nun eine normale Hadamardtransformation angewandt. Diese liefert die gesuchte vorgefilterte Maximalfolge zeitinvers:

*h(-t) * m(-t) = v(-t)*

Das Resultat wird erneut gespiegelt, womit die vorgefilterte Maximalfolge *v(t)* auch schon fertig ist. Die Vorgehensweise entspricht einem Vorschlag von Jeffrey Borish, der zur Herleitung aber umständlich mit Matrizenoperationen argumentiert, um dann schließlich darauf zu kommen, daß zur Realisierung nur die Sortierreihenfolge der beiden Permutationen umgedreht werden muß. Dies entspricht natürlich den genannten zeitlichen Spiegelungen.

Abbildung 23 zeigt nun eine auf diese Art erzeugte, in den unteren Oktaven um 20 dB angehobene, ehemalige Maximalfolge des Grades 13, die sich gut zur Lautsprechermessung eignet und auch besser anhört als die nackte weiße MLS. Die Gestaltung dieses Meßsignals erfolgte mit einem Färbungsfilter, dessen Impulsantwort so kurz wie möglich sein sollte. Dies wurde durch „enge“ Fensterung (5 ms) und anschließende Hilberttransformation der Vorgabe-Impulsantwort erreicht. Eine Ausfensterung von störenden Reflexionen ist dann auch vor der Kompensation der tieffrequenten Anhebung (die erst nach Transformation in den Frequenzbereich erfolgen kann) noch einigermaßen gut möglich. Selbstverständlich sind auch andere Eckfrequenzen und Anhebungen geeignet. Die Frequenz, die das Signal in zwei Bänder gleichen Energieinhaltes aufteilt, liegt bei diesem Beispiel mit 4,7 kHz immer noch recht hoch.

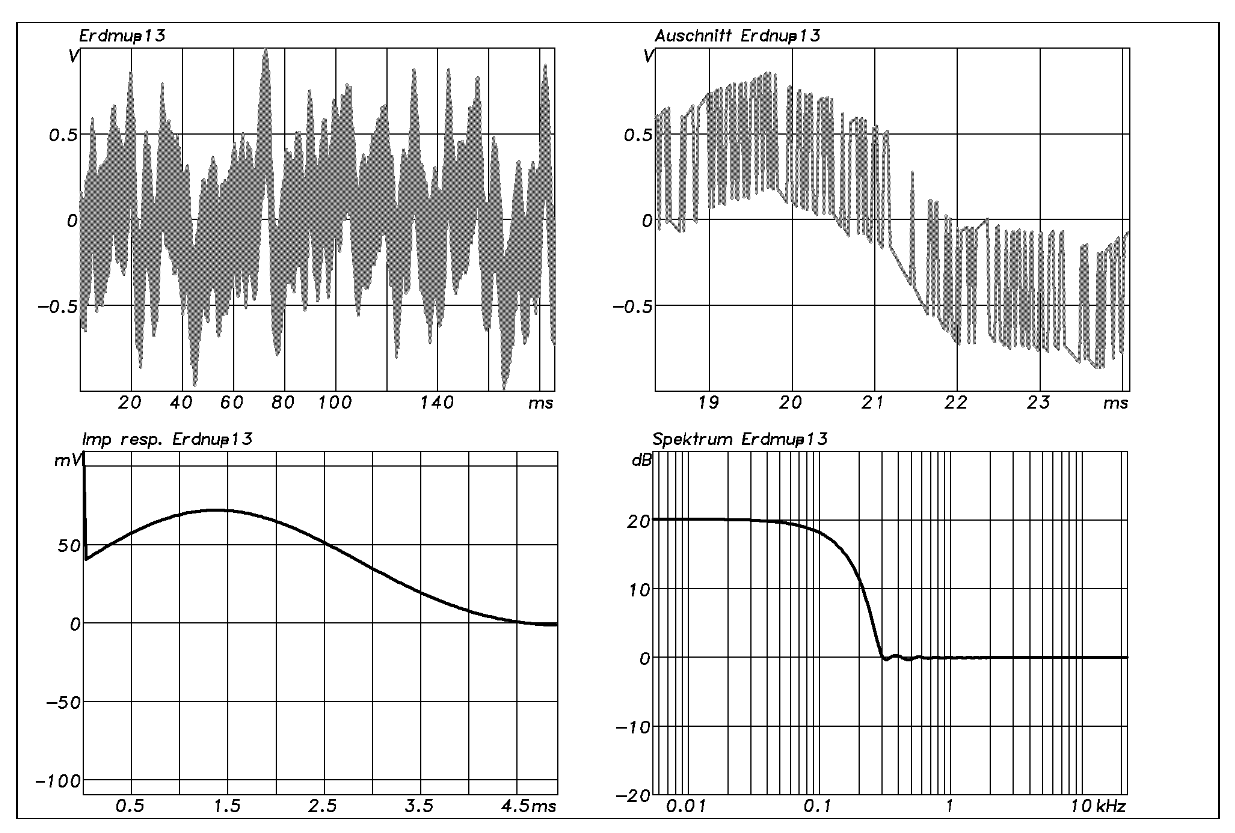


Abbildung 23: Zeitsignal, Impulsantwort und Spektrum einer für Lautsprechermessungen geeigneten, gefilterten Maximalfolge des Grades 13 (Crest: 7,6 dB). Die Amplitude der Impulsantwort ist zur Verdeutlichung vergrößert dargestellt, die Amplitude des ersten Wertes am linken Rand beträgt 1V

Nicht nur der Amplitudenfrequenzgang des Stimulus läßt sich auf diese Weise maßgeschneidert den Meßbedingungen anpassen. Durch geschickte Wahl der Phasen bzw. Laufzeiten lassen sich beispielsweise auch vorgefilterte Maximalfolgen generieren, die nach dem Durchlaufen einer akustischen Meßstrecke und anschließender FHT eine zügig ausklingende Impulsantwort zeigen, die dann sehr gut von geringfügig später eintreffenden Reflexionen getrennt werden kann. Dies ist beispielsweise bei der In-situ Messung des Reflexionsverhaltens von Oberflächen von großem Nutzen [Mom95b]. Weitere Details und interessante Anwendungen zu vorgefilterten Maximalfolgen sind in [Mom95a] zu finden. Die *beliebige* Färbung der MLS eröffnet jedenfalls in vielen Fällen die Möglichkeit zu entscheidenden Verfeinerungen der Meßverfahren, die sich mit MLS-Meßsystemen, die auf einem Hardware-MLS-Generator basieren, *nicht* erzielen lassen. Außerdem bietet ein echter DA-Wandler im Meßsystem natürlich die Flexibilität, völlig andere Meßsignale wie z.B. Sinustöne zur Klirrfaktormessung zu nutzen oder zur subjektiven Evaluierung der Klangeigenschaften eines Lautsprechers einfach nur gesampelte Musikbeispiele von der Festplatte abzuhören.

Durch die Färbung verliert das aus der Maximalfolge gewonnene Pseudorauschsignal allerdings seine Eigenschaft, ein gutes Korrelationssignal (im Sinne einer möglichst diracförmigen PAKF) zu sein. In der Tat bedeutet die Färbung ja ein absichtliches Abweichen von der alternativ auch im Frequenzbereich zu formulierenden Forderung nach Energiekonstanz aller beinhalteten Frequenzen. Die Hadamardtransformation läßt sich zwar selbstverständlich weiter anwenden, liefert aber naturgemäß die mit der Impulsantwort des Färbungsfilters gefaltete Impulsantwort des Meßobjektes. Die Korrektur kann sinnvoll nur im (durch FFT der Impulsantwort erhältlichen) Spektrum mit Hilfe der Division durch das Anregungsspektrum erfolgen.

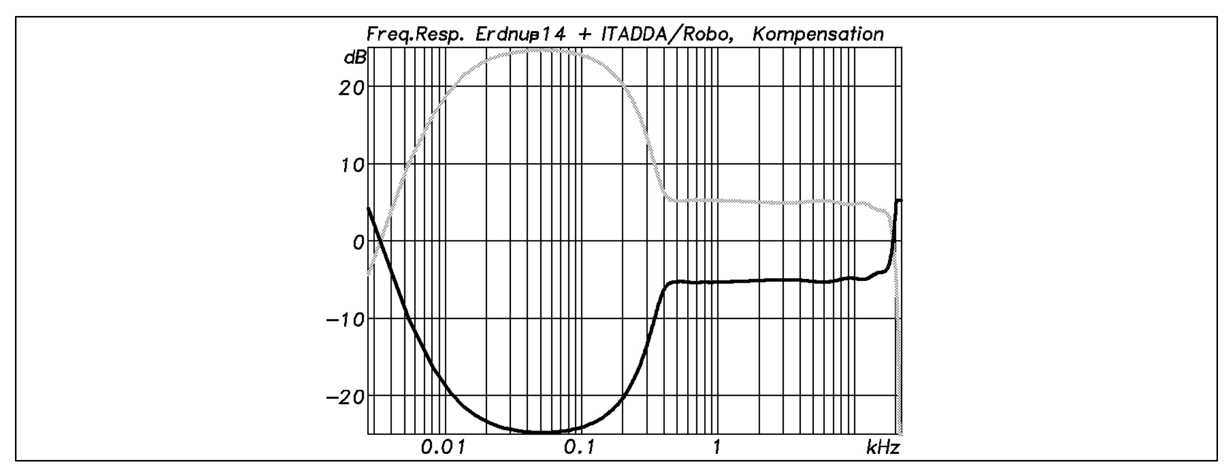


Abbildung 24: Eigenfrequenzgangsmessung eines mit einem 16 Bit Soundkarten-Codec ausgestatteten, preiswerten Meßsystems mit gefärbter Maximalfolge wie in Abbildung 23 (grau) und daraus ermitteltes Kompensationsspektrum (schwarz) mit Invertierungsdynamik von 30 dB. Zu erkennen sind neben der Färbung des Anregungssignals auch die leichte Welligkeit der Digitalfilter und deren Tiefpasswirkung ab 18 kHz, sowie die Wirkung eines analogen Hochpass (ab 50 Hz abwärts).

Diese Maßnahme gestattet es allerdings, gleich noch etwaige Unregelmäßigkeiten der Frequenzgänge von Wandlern und Verstärkerstufen des Meßsystems zu kompensieren. Zu diesem Behufe werden Ausgang und Eingang des Meßsystems direkt verbunden und der Eigenfrequenzgang gemessen. Diese Referenzmessung wird am besten invertiert und kann dann als (multiplikativ anzuwendendes) Kompensationsspektrum allen darauf folgenden Messungen dienen (Abbildung 24). Auf diese Weise lassen sich je nach Konstanz der Spannungsreferenzen der Wandler Meßgenauigkeiten von 1/1000 dB oder sogar noch besser erzielen.

Bei akustischen Messungen bietet die Kompensationstechnik zudem die Möglichkeit, ein preiswertes Electret-Mikrophon statt der normalerweise eingesetzten, sündhaft teuren Kondensator-Meßmikrophone zu verwenden. Diese empfindlichen, mit einer hauchdünnen Metallfolie ausgestatteten Präzisionswandler sind nicht nur trittschall-, sondern auch sehr trittempfindlich. Findet die Messung in Bodennähe statt, bleibt zur Vermeidung von reflexionsbedingten Kammfiltereffekten zumeist gar keine andere Wahl, als das unscheinbare und wehrlose Mikrophon direkt auf den nackten Boden zu legen. Nur all zu häufig wird es bei einer hektischen Meßreihe Opfer des unachtsam herumlaufenden Personals. Zum Werterhalt der Laborausstattung ist also vor allem bei Außeneinsätzen der Einsatz eines wesentlich preiswerteren Standardmikrophons, dessen eventueller Verlust weniger schmerzt, sehr wünschenswert.

Prinzipiell lassen sich auch einfache Electretmikrophone mit einem verblüffend glatten Frequenzgang herstellen (was ihren mitunter ausgezeichneten Klang erklärt), wenngleich die Linearität nicht an die der aufwendigen Kondensator-Meßmikrophone heranreicht. Mit Hilfe der *Substitutionsmethode* lassen sich die Abweichungen aber erfassen und zur Kompensation heranziehen. Dazu bringt man einen Lautsprecher in Position und mißt den Frequenzgang der akustischen Übertragungsstrecke zunächst mit dem Referenzmikrophon. Danach wird dieses durch das preiswerte Mikro an genau der selben Stelle *substituiert* und die Messung wiederholt. Wenn es schnell gehen muß, lassen sich die Mikrophone auch *gleichzeitig* zweikanalig nebeneinander messen (*Komparationsmethode*), wobei durch die gegenseitige Beeinflußung die Genauigkeit geringfügig leidet. Das Quotientenspektrum H_{REF}/H_{BILLIG} läßt sich nun als (wiederum multiplikativ anzuwendendes) Korrekturspektrum für Messungen mit dem preiswerten Mikrophon benutzen. An den Lautsprecher ist nur die Forderung zu stellen, daß er alle Frequenzen des Audiobandes mit ausreichendem Pegel zur Erzielung einer zufriedenstellenden Meßdynamik abstrahlt. Mit einem vorgefilterten Meßsignal läßt sich insbesondere im tieffrequenten Bereich nachhelfen.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist im Vergleich zu rein elektrischen Kompensationen erschütternd schlecht, ein halbes dB Unsicherheit ist auch bei sorgfältiger Durchführung zu beklagen. Etwas bessere Ergebnisse lassen sich durch Messung in einer Druckkammer erzielen, wobei das Mikrophon dann aber luftdicht in die Öffnungen passen muß.

Die hier vorgestellten Möglichkeiten der spektralen Kompensation macht die Forderung an das Meßsignal, gut autokorrelierend zu sein, im Grunde genommen obsolet. Tatsächlich werden durch die komplexe Kompensation ja nicht nur die Amplituden, sondern auch die Phasen der gesamten Meßstrecke *und* des Anregungssignals korrigiert. Unter diesem Gesichtspunkt ist die vor der Transformation in den Frequenzbereich zu absolvierende Hadamardtransformation, die *ausschließlich* die Phasen korrigiert,

eigentlich ein überflüssiger Schritt der Maximalfolgenmeßtechnik (der aber dennoch nicht umgangen werden kann, da die MLS eine Periodenlänge von 2^n-1 besitzt und deshalb nicht direkt der FFT zugeführt werden kann, da diese nur bei einer Periode von 2^n korrekte Ergebnisse liefert). Dies gilt zumindest dann, wenn letztendlich nur die Übertragungsfunktion von Interesse ist. Andererseits ist es zumindest bei akustischen Messungen fast immer vorteilhaft, ein Fenster zur Ausblendung von Reflexionen und Störungen in der Impulsantwort einzusetzen. Dies kann bei Verwendung der 2^n- Signale aus den gemessenen Übertragungsfunktionen nur durch IFFT, Fensterung und anschließende Rück-FFT erfolgen. Bei Maximalfolgenmessungen läßt sich die Fensterung hingegen „unterwegs“ zwischen FHT und FFT erledigen. Bei gefärbten Maximalfolgen ist die Impulsantwort allerdings breiter, so daß die Fensterung eventuell auch hier erst *nach* der Spektrums-Kompensation erfolgen kann. Einen gangbaren Ausweg stellt die Vorfilterung der Maximalfolgen mit einer möglichst kurzen Filterimpulsantwort dar, wie dies für die gefärbte MLS in Abbildung 23 ja auch geschehen ist. In vielen Fällen kann die Fensterung dann auch auf die noch unkompensierte Impulsantwort angewandt werden.

7.6 Fensterung

Die Fensterung, also Ausblendung der Impulsantwort ab einem bestimmten Zeitpunkt, ist bei den meisten akustischen Messungen ein unabdingbarer Bestandteil der Meßdatenverarbeitung. Zum einen kann man sich mit ihrer Hilfe unerwünschter Reflexionen entledigen, die ohne Eliminierung zu störenden Kammfiltereffekten führen. Zum anderen lassen sich Störungen durch Lärmimission oder Nichtlinearitäten des Prüflings unterdrücken, womit sich das Signal/Rauschverhältnis der Messung verbessern läßt. Nichtlinearitäten führen bei der Messung mit Maximalfolgen zu einem erhöhten Rauschteppich sowie zu mehr oder minder starken Phantompeaks in der Impulsantwort, die sich über die gesamte Dauer der Meßperiode ausbreiten (Abbildung 26). Diese Artefakte haben auf das Spektrum eine ähnliche Wirkung wie mehrfache Reflexionen. Sie führen zu einem breiten „buschigen" Verlauf, der sich – mikroskopisch betrachtet – aus vielen kleinen Einbrüchen und Überhöhungen zusammensetzt. Da sich die Störungen ziemlich gleichmäßig über die Länge der periodischen Impulsantwort verteilen, empfiehlt sich bei der Frequenzgangskontrolle von nichtlinearen Meßobjekten die Verwendung eines möglichst langen Anregungssignals. Das Verhältnis der ausblendbaren zur gesamten Störenergie vergrößert sich dadurch. Das ausblendende Fenster sollte selbstverständlich erst dort greifen, wo die Impulsantwort vollständig im Störteppich versunken ist.

Sollen allerdings Reflexionen unterdrückt werden, muß das Fenster meistens sehr viel früher einsetzen. Leider wird dann aber der Auswertebereich zu tiefen Frequenzen hin deutlich eingeschränkt. Während die hochfrequenten Anteile der Impulsantwort zumeist sehr schnell verklungen sind, ist bei den tieferfrequenten stets ein längeres Nachschwingen zu beobachten. Selbst wenn der Prüfling sich nicht dispersiv verhält, wächst bekanntlich die zeitliche Unschärfe zu tiefen Frequenzen hin. Der Beginn des gültigen Bereichs der Messung verschiebt sich also um so weiter nach oben, je mehr sich das ausblendende Fenster der Impulsantwort nähert. Hochtöner lassen sich noch bequem in normalen Räumen messen, wenn man durch Anordnung der Meßstrecke in der Raummitte dafür Sorge trägt, daß die erste Reflexion möglichst spät eintrifft. Eine Separation der vollständigen Impulsantwort von allen Reflexionen gelingt dann zumeist mühelos. Für Mitteltöner ist dies am unteren Ende ihres Übertragungsbereichs schon kaum noch möglich, und für Messungen im Tieftonbereich bedarf es echter Freifeldverhältnisse. In diesem Frequenzbereich ist es in kleinen bis mittelgroßen Räumen überhaupt nicht mehr möglich, Direktschall und Reflexionen sauber zu trennen.

Die Problematik sei exemplarisch an der Messung einer PA-Box (Bestückung: 12", 2" mit CD-Horn) im reflexionsarmen Halbraum gezeigt (Abbildung 25), bei der das Mikrophon

nicht auf dem schallharten Boden lag, sondern sich in Höhe des Lautsprechers (2 m) befand. Die erste Reflexion trifft ca. 7 ms später ein, entsprechend einem Umweg von 2,4 m. Konstruktive und destruktive Interferenzen wechseln sich alle 71,5 Hz ab und verursachen ein markantes Kammfiltermuster, dessen .Amplitude zu hohen Frequenzen wegen der zunehmenden Richtwirkung des Testlautsprechers allerdings spürbar abnimmt (Abbildung 25 unten links). Zur Unterdrückung dieser unschönen Störungen muß die Impulsantwort bis zum Eintreffen der ersten Reflexion vollständig ausgeblendet werden, wobei es unvermeidlich ist, daß die tieferfrequenten Anteile in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Auswirkung der Fensterung sind im Spektrum der Abbildung 26 unten rechts ersichtlich: Das Kammfilter-Interferenzmuster ist zwar vollständig verschwunden, dafür erfährt das Spektrum im unteren Bereich eine fehlerhafte Verrundung, welche die Messung unterhalb von ca. 500 Hz unbrauchbar macht. Insbesondere der steile Abfall unterhalb von 60 Hz wird überhaupt nicht mehr korrekt dargestellt. Zu sehr tiefen Frequenzen geht der Frequenzgang sogar in einen gänzlich falschen waagerechten Verlauf über. Durch die Fensterung gleichen sich positive und negative Halbwellen der Impulsantwort nicht mehr vollständig aus, so daß ein Gleichanteil übrigbleibt.

Es ist nicht so leicht möglich, eine untere Frequenzgrenze der Gültigkeit in Abhängigkeit eines erlaubten Pegelfehlers und der Fensterposition anzugeben, da diese Grenze auch davon abhängt, wie sehr die tieffrequenten Anteile der Lautsprecherimpulsantwort nacheilen. Alternativ zum einseitig ausblendenden Fenster läßt sich auch ein vollständiges Standardfenster symmetrisch zur Spitze der Impulsantwort anwenden, wobei die tieffrequenten Anteile erfahrungsgemäß aber noch deutlich stärker gedämpft werden. Anderseits verursacht ein solches Fenster weniger fehlerhafte Schwankungen in den darüber liegenden Frequenzbereichen.

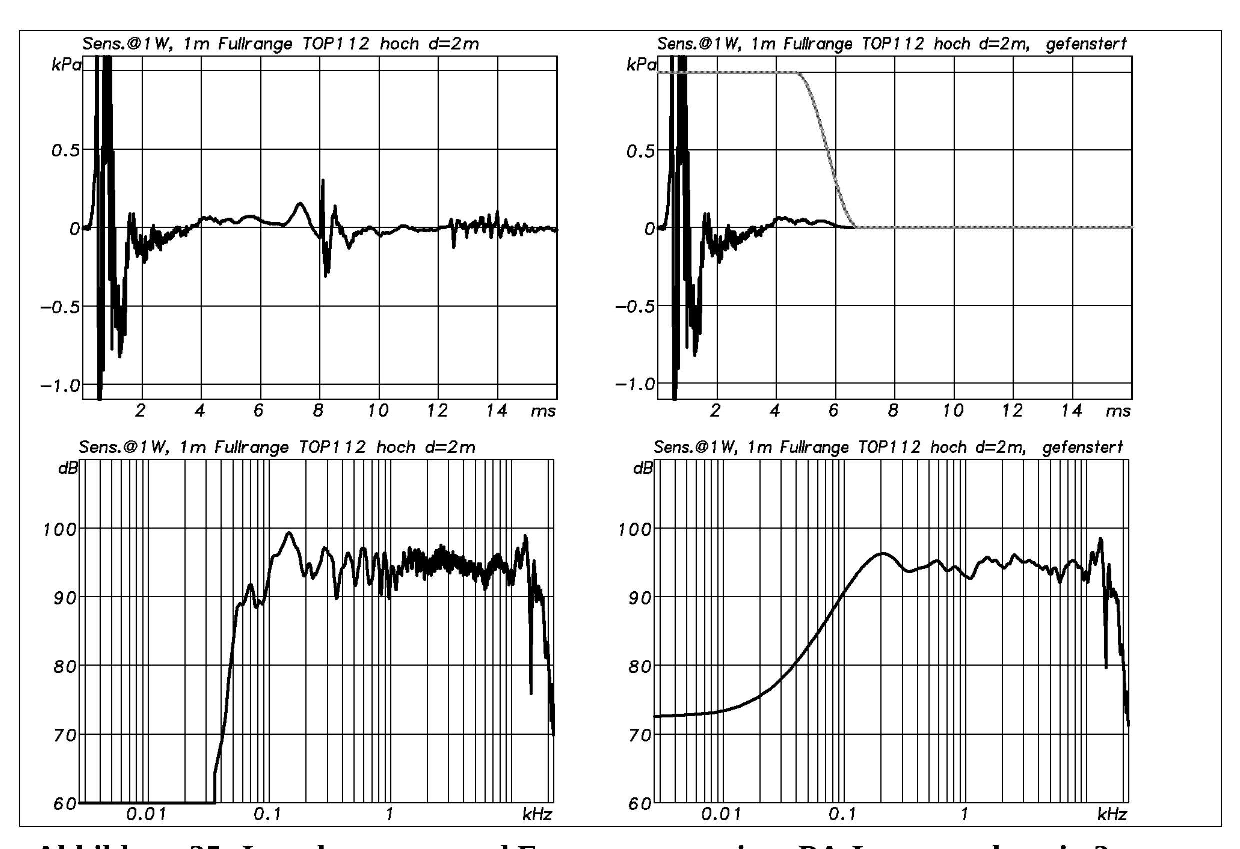


**Abbildung 25: Impulsantwort und Frequenzgang eines PA-Lautsprechers in 2 Meter Höhe mit Bodenreflexion.
Die Impulsantwort ist zur Verdeutlichung der Reflexionen in Y-Richtung vergrößert dargestellt (Peak der Impulsantwort: 7,36 kPa) Links: Original mit Reflexion, rechts mit Fensterung.**

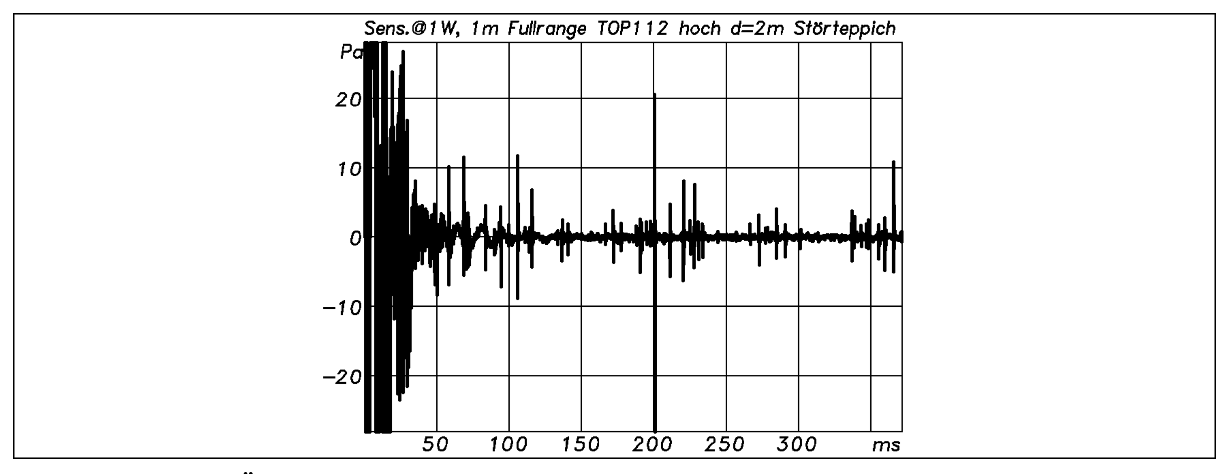


Abbildung 26: Über die gesamte Meßperiode dargestellter, vergrößerter Störteppich der Messung von Abbildung 25

Auch bei „optimalen“ Meßbedingungen im reflexionsarmer Raum läßt sich der Baß-Frequenzgang eines Lautsprechers nicht ohne weiteres ermitteln, da ein solcher Raum durch die stets begrenzte Absorber-Keillänge zu tiefen Frequenzen hin seine hohen Absorptionseigenschaften zunehmend verliert. Übersteigt die Wellenlänge das Vierfache

der Keillänge, ist ein gutes „Verschlucken“ des einfallenden Schalls nicht mehr gegeben und es bilden sich die üblichen Schalldruckschwankungen im Raum aus.

Immerhin kann man sich mit Nahfeldmessungen aller schallabstrahlenden Öffnungen und deren anschließender (mit der Wurzel der Flächenverhältnisse bewerteter) komplexer Addition behelfen. Diese aufsummierte Nahfeldmessung läßt sich dann in einem Bereich, wo Nah- und Fernfeldmessung gültig sind, an die Fernfeldmessung „ankleben“. Dazu müssen nicht nur die Amplitude, sondern auch die Laufzeit und die Phase so angepaßt werden, daß es an der Klebestelle keine Diskontinuitäten gibt. Leider stimmt das Ergebnis nicht immer mit dem unter echten Freifeldbedingungen meßbaren Frequenzgang überein, liegt aber trotzdem näher an der Wahrheit als die Standard-Achsmessung in einiger Entfernung.

Die korrekte Ermittlung des gesamten Frequenzgangs eines Lautsprechers stößt also in der Praxis durchaus auf einige Schwierigkeiten. Blättert man in den Katalogen von Lautsprecherherstellern oder in Testberichten, so fallen sehr häufig Ungereimtheiten auf, die zumeist auf eine zu knappe Ausfensterung zurückzuführen ist. Diese verleiht dem Frequenzgang im unteren Bereich zwar einen schmeichelhaft glatten, aber nicht den Tatsachen entsprechenden Verlauf. Einwandfreie Meßergebnisse sind für die FIR-Filtererzeugung, der sich das nun folgende Kapitel ausgiebig widmet, selbstverständlich von größter Bedeutung.

8 Beispiele

In diesem Kapitel werden verschiedene häufig vorkommende Messung beschrieben und die notwendigen Einstellung im Meßprogramm aufgelistet. Ausgehend von solchen Beispielen gelingt es meist einfacher eigene Varianten mit individuellen Einstellungen abzuleiten. Zu jedem Beispiel findet sich auf der Programmdiskette ein zugehöriges Pickfile, daß alle Einstellung für die entsprechende Messung konfiguriert. Im `Utility` Menu können unter `PCK File Menu...` Pickfiles geladen und gespeichert werden.

8.1 Hardware Einstellungen

Die Philosophie bei MF basiert darauf, daß über eine Referenzmessung zunächst das Verhalten der gesamten Meßkette mit Ausnahme des eigentlichen Meßobjekt bestimmt wird. Einfach ausgedrückt bedeutet dieses, daß sich das Meßsystem selber mißt. Die dabei ermittelte Datei enthält den Frequenz- und Phasengang der Meßkette, der von nun an aus allen weiteren Messungen heraus gerechnet werden kann, so daß jegliche linearen Meßfehler von Endstufen, Vorverstärkern, AD- und DA-Umsetzern usw. kompensiert werden. Das zum Meßsystem gehörige Robo-Frontend erlaubt eine sehr einfache Form der Referenzmessung, ohne die externe Verkabelung abändern zu müssen, in dem über eine Reihe von Relais die äußeren Ein- und Ausgänge abgeschaltet und intern gebrückt werden. Je nach gewähltem Meßmodus werden die Endstufen oder die Referenzwiderstände mit in die Meßschleife einbezogen oder nicht. Ebenso wird eine mögliche Frequenzgewichtung des Anregungssignales mit erfaßt. Bei Lautsprechermessungen kann optional noch eine Kompensationsdatei für das Meßmikrophon mit in die Referenzdatei einbezogen werden. In den jeweiligen Menüs zur Referenzmessung ist der automatische Modus für die interne Verbindung im Frontend standardmäßig unter *Ref: int* aktiviert. Wenn keine interne Referenzmessung gewünscht ist, z.B. um eine externe Endstufe mit in der Referenzmessung einzubeziehen, muß dieser Schalter in die Stellung *Ref: ext* gebracht werden. Sobald eine Messung im internen Referenzmodus ausgeführt wird, wird dieses durch rote Leds an der Vorderseite des Frontends angezeigt. **Amp. Ref.** bedeutet, daß die Endstufe in der Referenzschleife eingeschlossen ist, **Line Ref** verbindet intern nur die symmetrischen Line Ein- und Ausgänge. Der dritte Referenzmodus für Impedanzmessungen arbeitet mit einem internen 10 Ohm Referenzwiderstand und wird über **10 Ohm Cal**. signalisiert. Das Ausgangssignal der Endstufe ist während der Referenzmessung über einen passiven Teiler um 20 dB abgeschwächt, was seitens der Software automatisch berücksichtigt wird.

Achtung: Bei der Referenzmessung ist peinlich genau darauf zu achten, daß keine Verzerrungen oder andere Meßfehler durch eine falsche Pegeleinstellung am Meßsystem entstehen. Mögliche Fehler würden sich in allen weiteren Messungen als sehr störend auswirken !!! Der Aussteuerungsbalken sollte daher nach einer Referenzmessung immer kurz in Augenschein genommen werden. Abbildung 33 zeigt ein Beispiel mit richtig und falsch ausgesteuerten Referenzmessungen.

Tip: Die Phantomspeisung ist bei der Referenzmessung abzuschalten !! Auch bei der Referenzmessung bietet die Autorange Funktion einen sicheren Schutz gegen falsche Aussteurung.

Für alle folgenden Beispiele gelten die Einstellungen aus Tabelle 13 für das Hardware Setup. Nach Bedarf kann noch die Abtastrate eingestellt werden (typisch 44,1 kHz) und der oder die Eingangskanäle ausgewählt werden. Die sehr wichtige Einstellung der Ein- und Ausgangspegel hängt natürlich stark vom Meßobjekt ab und kann nicht pauschal beantwortet werden. Grundsätzlich empfiehlt es sich, die *Autorange* Option einzuschalten, womit sich die Eingangsempfindlichkeit automatisch anpaßt. Der Ausgangspegel wird von der Autorange Funktion nicht beeinflußt.

Grundsätzlich gilt, daß die Eingangsempfindlichkeit nur unter `AD/DA Basic Settings` bei *AD fullscale* einzustellen ist. Aus den jeweiligen Meßmenüs unter `AD/DA` kann in praktischer Weise mit der Taste # zu `AD/DA Basic Settings` gewechselt werden um die Einstellung zu ändern. Danach springt man mit der ↵ Taste schnell in das vorherige Meßmenü zurück.

Der Ausgangspegel kann im jeweiligen Meßmenü mit *Level* bezogen auf den Fullscale Wert des Ausgangs eingestellt werden. Dieser findet sich ebenfalls im Menü `AD/DA Basic Settings` unter *DA fullscale*. Beträgt der DA fullscale Wert beispielsweise 0 dBu und die Level Einstellung -10 dB, so bedeutet das einen Ausgangspegel von -10 dBu. Die am Frontend über das einzige Poti an der Frontplatte einzustellende Verstärkung der Endstufe sollte möglichst immer bei +20 dB belassen werden, da dieser Wert nicht von der Software erfaßt wird und bei Fehleinstellungen die Pegelbezüge verfälscht würden.

AD/DA Basic settings			
Hardware		💣	ITADDA16
Input		💣	Line

AD/DA Basic settings			
Port address			$0530 (bei Bedarf auf der ITADDA16 Platine ändern und neu einstellen oder per Autodetekt (?) suchen lassen)
AD voltage range			109,54 V
DA voltage range			10,954 V
AD sampling rate			44,1 kHz oder 48 kHz
DA bits			16
AD/DA clock			Internal
Trigger active			No
DA clock always int:			yes
AD inputs			Left/right/stereo
Frontend			Robo
AD fullscale			Siehe Tabelle 14
DA fullscale			Siehe Tabelle 14
Remote			int
Auto range			Yes
DA inv. R channel			No
Overlapped AD $			no

Tabelle 13 ***`ADDA basic settings`*** **Einstellung für Beispielmessungen**

Für eine Frequenzgangmessung sind Ein-Ausgang des Meßobjektes mit dem Frontend zu verbinden. Bei Geräten mit unsymmetrischen Ein- bzw. Ausgängen müssen XLR-Chinch oder XLR-Banane Adapter mit einer internen Verbindung der XLR-Pins 1 und 3 für die Ein- und Ausgänge verwendet werden. Zunächst sollte man sich aber über die Verstärkungswerte des Meßobjektes und über die maximalen Ein- und Ausgangspegel Klarheit verschaffen. Die folgende Tabelle gibt hier eine kurze Übersicht für einige Beispielgeräte. Die Eingangsempfindlichkeit ist in einem extrem weiten Bereich von -40 dBu bis +40 dBu einstellbar, womit nahezu alle Anwendungsfälle abzudecken sind.

Lediglich sehr leistungsstarke Endstufe liefern Ausgangspegel von mehr als +40 dBu. Für diesen Fall empfiehlt sich ein externes Dämpfungskabel mit 20 oder 40 dB Dämpfung.

Tip: EQs und ähnliche Geräte eignen sich besonders gut, den Umgang mit dem Meßsystem zu erlernen, da hier keine akustischen Artefakte ihr Unwesen treiben und weitergehende Schäden bei Fehlbedienung sehr unwahrscheinlich sein dürften.

Welches der Meßmenüs im Hauptmenü *AD/DA* für welche Messungen geeignet ist, zeigt in einer Übersicht Tabelle 9.

8.2 Frequenzgangmessung an Verstärkern, EQ's, ...

Zum Beginn einer Meßreihe ist eine Referenzmessung zu machen, die keine externe Verschaltung erfordert. Lediglich die Eingangsempfindlichkeit und der Ausgangspegel am Meßsystem müssen laut Tabelle 14 angepaßt werden. Alle weiteren Einstellungen erfolgen im Menupunkt *AD/DA Frequency Response* nach Tabelle 15.

	Equalizer	Endstufe	Mikroverstärker
Typ. Eingangspegel	0...+20 dBu	0...+14 dBu	-60...0 dBu
Typ. Ausgangspegel	+20 dBu	20...46 dBu	+20 dBu
Typ. Verstärkungen	0 dB	20...40 dB	0..60 dB
Ausgangspegel am Meßsystem Level im Meßmenu auf –10 dB fs	-10 dBu	-10 dBu	-30 dBu
Eingangsempfindl. am Meßsystem (AD fullscale)	+20 dBu oder Autorange	+40 dBu oder Autorange (bei Pegeln über +40 dBu muß ein externes Dämpfungs-kabel eingesetzt werden)	10 dBu oder Autorange
Ausgangspegel am Meßsystem bei der Referenzmessung	-6 dBu	-6 dBu	-6dBu
Eingangsempfindl. am Meßsystem bei der Referenzmessung AD fullscale	0 dBu oder Autorange	0 dBu oder Autorange	0 dBu oder Autorange

Tabelle 14 Beispieleinstellungen für Frequenzgangmessungem an EQs, Endstufen und Vorverstärkern

AD/DA Frequency Response			
Mode	single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Degree	14		Grad der Maximalfolge Auflösung im Frequenzbereich: Abtastrate/2^{Grad} z.B.: 48 kHz/2^{14} = 2.93 Hz
Pre sends	1		Vorab ausgesendete Anzahl Maximalfolgen
Averaging	4		Anzahl der Messungen über die gemittelt wird
Level	-10 dB FS		Pegel in Bezug auf die DA fullscale Einstellung
Build imp. resp.	post comp		Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen und weiter verarbeiten (siehe auch 8.5) Pre = Impulsantwort des gesamten Meßstrecke zur Fensterung verwenden Post = Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen und weiter verarbeiten, d.h. nur die Impulsantwort des Meßobjektes für die Fensterung verwenden
Group delay comp.	none		Laufzeitkompensation
Window	no		Fensterfunktion für die Impulsantwort
Equalizing	file		Kompensation aus der Referenzmessung

AD/DA Frequency Response			
Equalizing file	COMP14.SPK		Dateiname der Refererenz-messung
Smooth	no		Glättung
Dynamic range	50 dB		Darstellungsbereich
Ref. for 0 dB	1		Referenz für 0 dB in der Darstellung
On top	25 dB		Oberkante der Darstellung
Info window	no		Infofenster bei der Messung
Go for it ←			Start der Messung
Reference and more	Vor der ersten Messung ausführen !		Fenster für Einstellungen bei der Referenzmessung

Tabelle 15 Einstellungen im *AD/DA Frequency Response* Menu

Frequency Response Reference			
Degree	14		Grad der Maximalfolge bei der Referenzmessung (wird automatisch gleich dem Grad im Hauptmenu gesetzt)
Exciter	MLS		Art des Anregungssignal
Origin	internal		Quelle des Anregungssignales
Level	-10 dB FS		Pegel in Bezug auf die fullscale Einstellung bei der Referenzmessung
Interleave	1		Interleaved Sampling mit Faktor

Frequency Response Reference			
Equalizing file	COMP14.SPK		Dateiname für die Referenzmessung
Dynamic range	30 dB		Maximale Kompensationsdynamik
Lower Cut Off	10 Hz		Untere Frequenzgrenze für die Kompensation
Upper Cut Off	22.05 kHz		Obere Frequenzgrenze für die Kompensation
Ref	int		Referenz intern oder extern
Go for it ! ←			Start der Referenzmessung

Tabelle 16 Einstellungen im *AD/DA Frequency Response Reference* Menu

Im ersten Schritt wird mit den oben aufgeführten Einstellung die Referenzmessung ausgeführt, die automatisch in der Datei COMP14.SPK abgespeichert wird. Es ist es dabei dringend zu empfehlen die Aussteuerung der Referenzmessung am Aussteuerungsbalken rechts unten auf dem Bildschirm zu prüfen oder die *Autorange* Funktion aus dem *AD/DA Basic settings* Menu zu benutzen. Der Pegel sollte zwischen -20 und 0 dB liegen. Ein Teilstrich entspricht 10 dB. Abbildung 27 zeigt ein Beispiel für den Grad 14 und eine interne Maximalfolge. Einstellungen: *internal ; MLS ; 14*

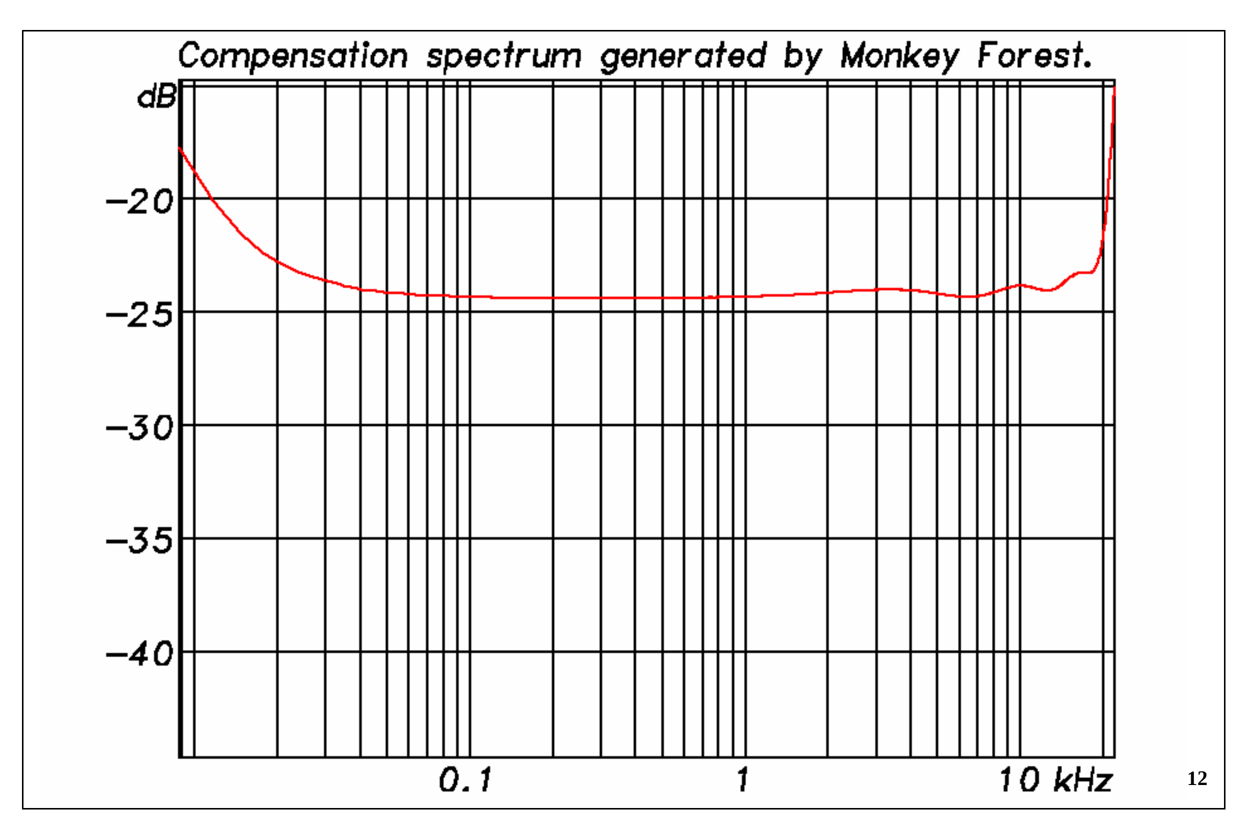


Abbildung 27 Beispiel für eine Referenzmessung mit Grad 14
Dateiname: COMP14.SPK

Für weitere Messungen wird diese Datei automatisch als Kompensationsdatei verwendet. Zum Test kann das Meßobjekt zunächst überbrückt werden, wobei sich dann bei einer Messung eine völlig gerade Linie bei 0 dB auf dem Bildschirm zeigen sollte. Im nächsten Schritt wird das Meßobjekt eingeschleift und gemessen. Abbildung 28 zeigt eine Beispielmessung an einem digitalen Equalizer. Gleichzeitig liegt auch der Phasengang und die Impulsantwort des EQs vor. Im Menu *Domain* kann die Darstellungsform ausgewählt werden.

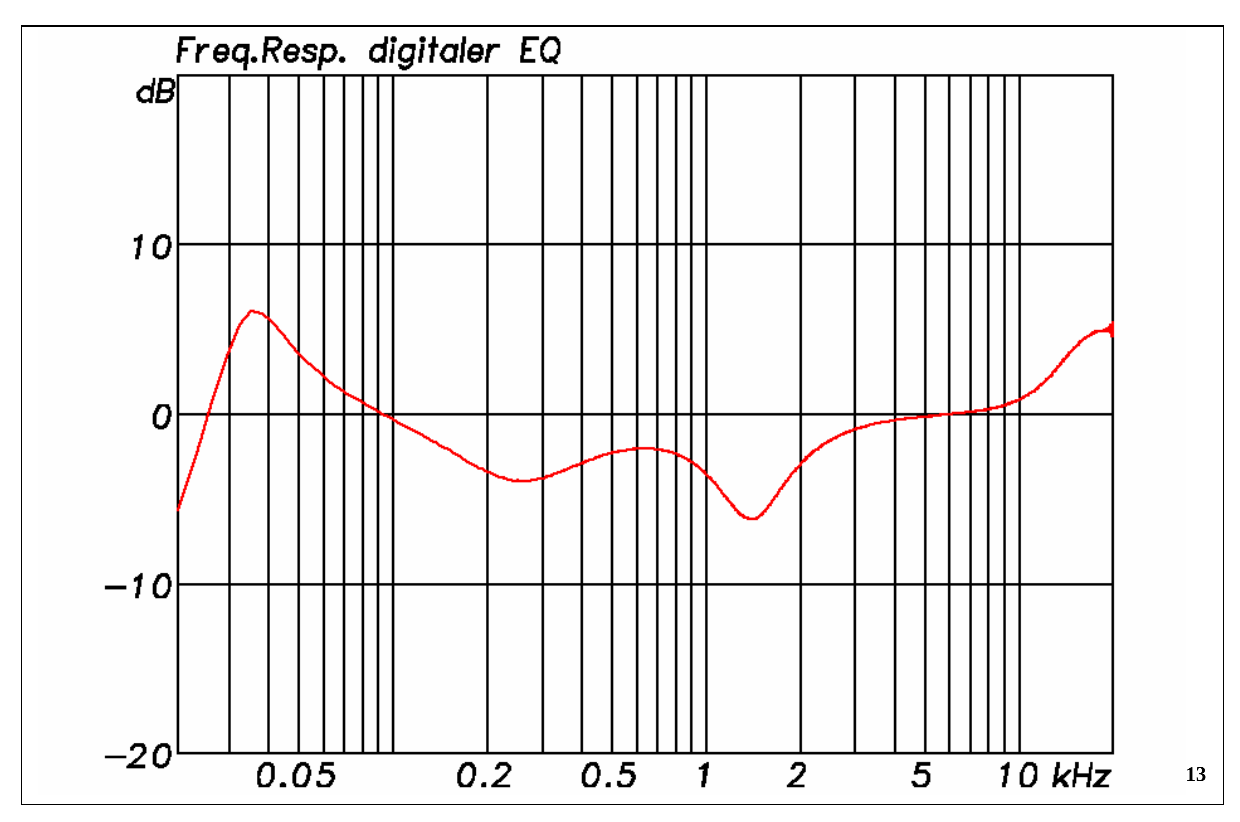


Abbildung 28 Frequenzgangmessung an einem digitalen Equalizer

Die Darstellung des Phasenganges (Tastenkürzel: `Ctrl P`) in Abbildung 29 weist eine sehr starke Phasendrehung auf, die nicht dem minimalphasigen Verlauf des Filters entspricht. Die Ursache liegt in der Grundlaufzeit, die ein digitales Gerät (hier der EQ) systembedingt verursacht, wie auch in der Impulsantwort in Abbildung 30 zu erkennen ist. Die Umschaltung auf die Darstellung der Impulsantwort geschieht über das *`Domain`* Menu oder das Tastenkürzel `Ctrl U`.

Diese Grundlaufzeit kann schon bei der Messung automatisch kompensiert werden, wenn im Menu *`AD/DA Frequency Response`* *Group delay comp.* auf *left aligned* geschaltet wird. Das Maximum in der Impulsantwort wird dann durch zyklisches Verschieben der Impulsantwort immer an den Anfang des Zeitsignales geschoben. Abbildung 31 zeigt den hieraus resultierenden Phasengang, der jetzt dem minimalphasigen Anteil zum Amplitudenverlauf aus Abbildung 28 entspricht. Das Verschieben des Maximums an den Anfang der Impulsantwort kann auch nachträglich über das *`Edit`* Menu erfolgen, indem zunächst der aktive Cursor mit `Shift M` auf dem Maximum plaziert wird. Mit der Funktion *`Cyclic Move`* im *`Edit`* Menu kann das Maximum verschoben werden. Anschließend sind die Cursor mit `Shift E` wieder am Anfang und Ende der Impulsantwort zu positionieren. Eine IFFT mit `Taste I` transformiert die bearbeitete Impulsantwort wieder zurück in den Frequenzbereich. Die Phasendarstellung mit `Ctrl P` liefert jetzt auch hier den minimalphasigen Anteil.

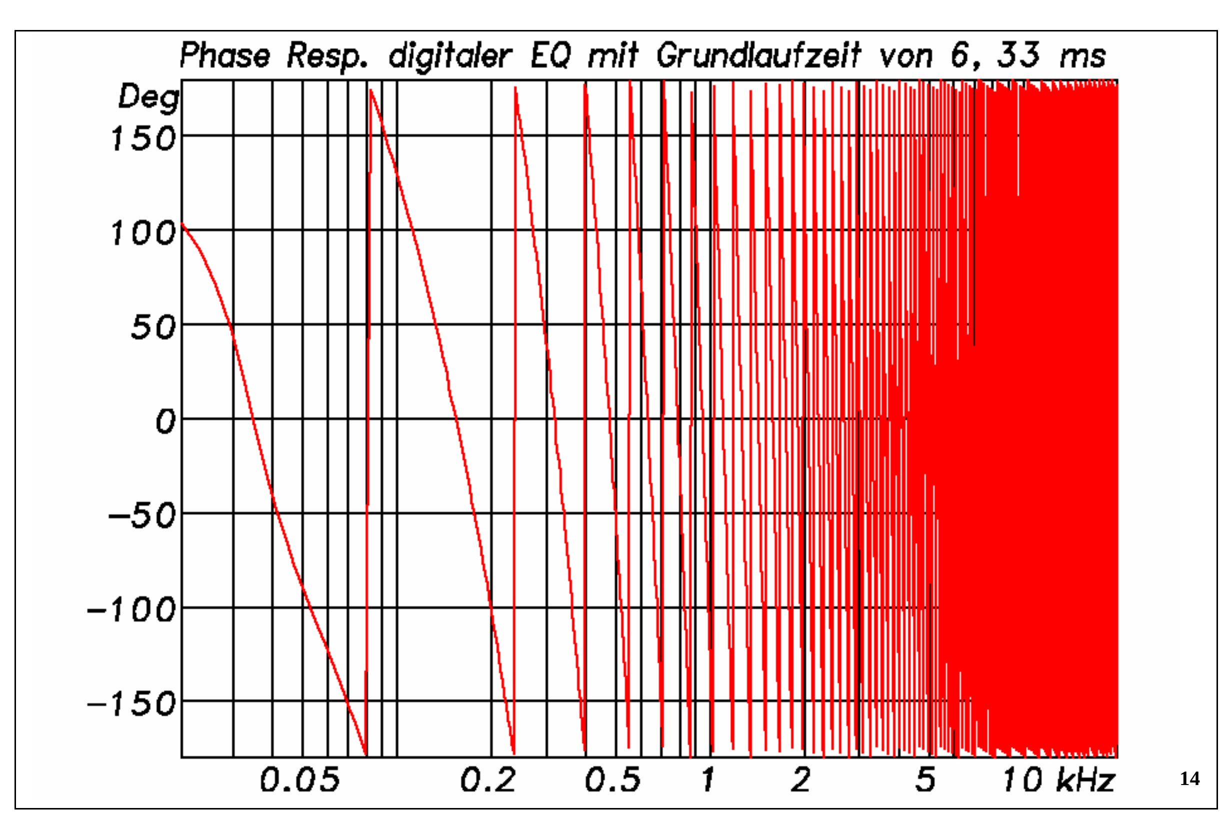


Abbildung 29 Zur Messung aus Abbildung 28 gehöriger Phasengang

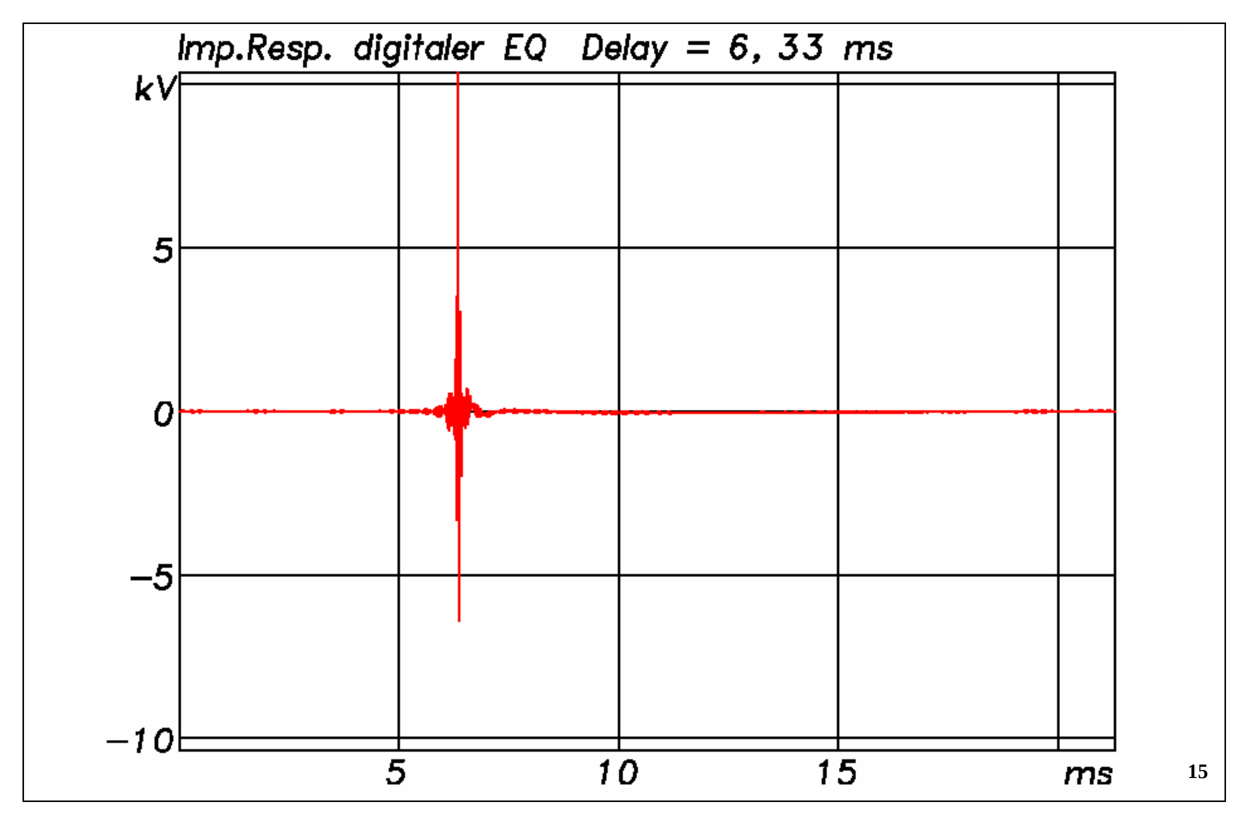


Abbildung 30 Zur Messung aus Abbildung 28 gehörige Impulsantwort

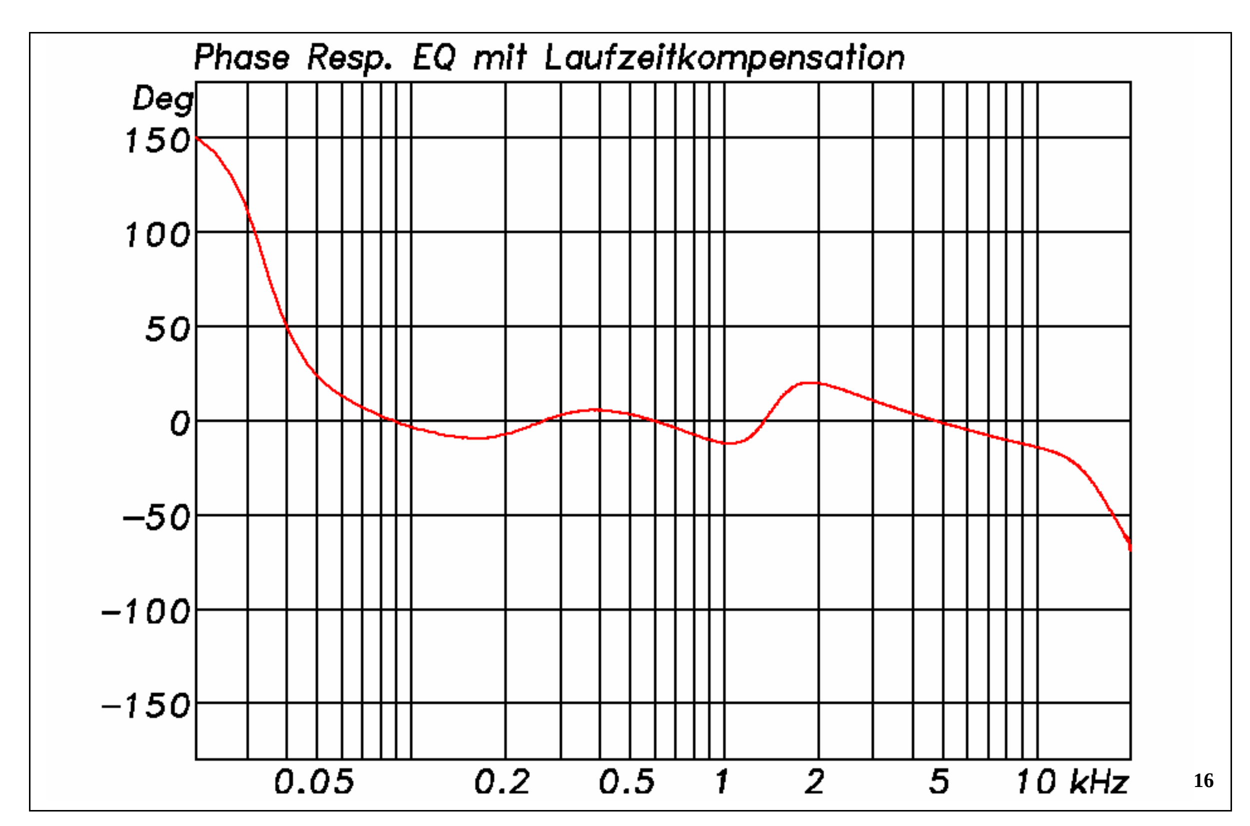


Abbildung 31 Zur Messung aus Abbildung 28 gehöriger Phasengang ohne Grundlaufzeit (minimalphasiger Anteil)

8.3 Frequenzgangmessung an Lautsprechern

8.3.1 Räumlichkeiten

Die Messung von Lautsprecherfrequenzgängen verlangt nach einer völlig reflexionsfreien Umgebung. Im Idealfall wäre das im Freifeld oder Halbfreifeld z.B. draußen auf einem großen Gelände. Halbfreifeldmessungen mit Mikrophon und Lautsprecher auf dem Boden plaziert, verlangen theoretisch einen für alle Frequenzen ideal schallharten Boden. Diese Voraussetzung wird bestenfalls von Granit- oder Mamorböden erfüllt. Keinesfalls schallhart für mittlere und hohe Frequenzen sind normale Beton- oder Pflastersteinböden. Eine Halbraummessung auf solchem Untergrund führt immer zu Meßfehlern bei höheren Frequenzen. Ebenso sind bei Luftbewegungen, die im Freien durch Wind oder durch Klimaanlagen innerhalb geschlossener Räume entstehen, Meßfehler zu befürchten, die sich durch einen stark schwankenden Verlauf von Messung zu Messung bei den höheren Frequenzen bemerkbar machen. Generell stellt sich eine Lautsprechermessung damit zunächst als schwierig dar.

Als Kompromißlösung können Räume mit reflexionsarmen Wänden oder ein hinreichend großer Freiraum um Lautsprecher und Mikrophon innerhalb eines normalen Raumes verwendet werden. Grundsätzlich ist dabei so vorzugehen, daß Lautsprecher und Mikrophon frei stehend auf Stativen o.ä. aufgebaut werden. Nach der Festlegung des Abstandes (je größer die Box um so größer sollte die Meßentfernung auch sein) kann so zunächst eine Probemessung gestartet werden. Bei einigen Metern Freiraum um den Meßaufbau gelingt es in der Regel mit einer geschickten Fensterung im Zeitbereich die störenden Reflexionen so weit auszublenden, daß die Kurve bis zu 200 Hz hinab Gültigkeit erlangt. Für tiefere Frequenzen kann dann eine Nahfeldmessung ergänzt werden, die unkritisch in Bezug auf Reflexionen ist. Die Lage gestaltet sich damit weniger hoffnungslos als anfänglich zu befürchten war.

8.3.2 Empfindlichkeit 1W/1m

Meist soll die Frequenzgangmessung für passive Lautsprechersysteme die Sensitivity bzw. Empfindlichkeit bezogen auf 1W/1m angeben. Das heißt, welchen Pegel erzeugt der Lautsprecher auf seiner Mittelachse gemessen in einer Entfernung von 1m bei einer Eingangsleistung von 1W. Die Leistung 1W bezieht sich hier immer auf die Nennimpedanz von 2, 4, 8 oder 16 Ohm und nicht auf die tatsächlich Impedanz des Lautsprechers, die frequenzabhängig sehr unterschiedlich ist. Richtiger wäre es also, wenn nicht die Leistung, sondern der Effektivwert der Spannung angegeben würde, die

eine Leistung von 1W an der entsprechenden Nennimpedanz bewirkt. Für einen 8-Ohm Lautsprecher wäre der adäquate Wert die Sensitivity bei 2,83V_{eff} in 1m Entfernung.

In welcher Entfernung sich Lautsprecher und Mikrophon bei der Messung mit MF zueinander befinden und mit welcher Ausgangsspannung gemessen wird, kann beliebig gewählt werden, da das Programm immer auf den entsprechenden 1W/1m Wert zurück rechnet. Selbstverständlich müssen hierzu die Angaben der Nennimpedanz und der Meßdistanz richtig eingestellt sein. Kleine Nahfeldmonitore können problemlos in einer Distanz von 1m gemessen werden. Größere Lautsprecher erfordern aber auch entsprechend größere Meßentfernungen, da ansonsten die Abstände der auf der Frontplatte angeordneten einzelnen Treiber nicht mehr hinreichend klein gegenüber der Meßentfernung sind. Als Faustformel gilt, daß die Meßentfernung mindesten das 5-fache des größten Abstandes der Mittelpunkte zweier Treiber auf der Frontplatte betragen sollte. Abhängig von der Lautsprecheranordnung können unterschiedliche Meßpositionen zu mehr oder weniger heftigen Interferenzeffekten in den Übernahmebereichen zwischen den einzelnen Wegen führen. Als günstig haben sich hier Positionen auf Achse des Hochtöners oder auf der Mittelachse zwischen Hoch- und Mitteltöner bzw. Hoch- und Tieftöner erwiesen. Befindet sich die Meßposition zu weit außerhalb der Mittelachse des Hochtöners, kann es zu Pegelabfällen bei den höchsten Frequenzen kommen. Insgesamt bedarf es also einiger Erfahrungen bei der Lautsprechermessung um alle Effekte richtig einschätzen zu können.

8.3.3 Meßsignale

Abhängig vom zu messenden Lautsprecher sollte die Frequenzgewichtung des Meßsignales gewählt werden. Bei einer herkömmlichen Maximalfolge ist die Energieverteilung im gesamten Frequenzbereich gleichförmig, d.h. für Lautsprechermessungen, daß ein Großteil der Leistung ungünstiger Weise dem Hochtonweg zugeführt wird. Ein weiterer Aspekt für die Wahl des Anregungssignales dürfte die spektrale Verteilung möglicher Störanteil bei einer Messung sein. Tieffrequente Störungen durch Wind, Maschinengeräusche etc. überwiegen hier meist. Eine herkömmliche Maximalfolge weist somit auch Nachteile für die Lautsprechermessung auf. Wenn ein Meßpegel für einen hinreichenden Störabstand im gesamten Frequenzbereich gewählt wird, werden Mittel- und Hochtonwege in den Lautsprechern unnötig heftig strapaziert. Verzichtet man auf exzessive Pegel im Hochtonbereich, so fällt der Störabstand unterhalb von 100 Hz in der Regel unbefriedigend schlecht aus. Abhilfe schafft meist eine vorverzerrte Rauschfolge (der Begriff Maximalfolge ist in diesem Fall streng genommen nicht mehr korrekt), wie es in 4.2.1 beschrieben ist. Unterhalb von 400 Hz wird hier der Pegel um ca. 20 dB angehoben, womit die Leistungsverteilung für

Lautsprechermessung deutlich günstiger ausfällt. Die Auswahl der vorverzerrten Rauschsignale erfolgt im jeweiligen Menü zur Referenzmessung über *Exciter: MLS* und *Origin: file*. Lediglich bei kleinen Höchsttönern, z.B. bei Kalotten, Schlitzstrahlern, Ringradiatoren u.ä. sollte diese Rauschfolgen nicht angewandt werden. Für diesen Fall lautet die Einstellung: *Exciter: MLS* und *Origin: internal*. Des weiteren besteht die Möglichkeit Anregungssignale als Rauschen oder Sweep mit einer gewünschten spektralen Verteilung selber zu generieren. Die Vorgehensweise wird in 8.15 noch genauer erläutert.

8.3.4 Referenzmessung

Das Vorgehen für eine Lautsprechermessung wird an dieser Stelle komplett beschrieben und beginnt wie immer mit einer Referenzmessung. Der Lautsprecher ist dafür zunächst mit einem der Endstufenausgänge am Frontend zu verbinden. Aktive Lautsprecher werden über den symmetrischen Line-Ausgang an der Frontplatte betrieben. Der zugehörige Menupunkt im *AD/DA* Menu ist *LS sensitivity - Reference and more*. Die Darstellung auf dem Bildschirm sollte sich im Frequenzbereich als Amplitudenverlauf befinden (Umschaltung mit Tastenkürzel `Ctrl M`).

Die Referenzmessung ist ein grundlegendes Element des Meßverfahrens von MF und muß mit allen Elementen der Meßkette mit Ausnahme des Meßmikrophones und des eigentlichen Meßobjektes, hier der Lautsprecher, erfolgen. Sodann können bei allen weiteren Messungen die Frequenzgangabweichungen, die durch die Meßkette selber und durch das vorverzerrte Anregungssignal verursacht werden, kompensiert werden. Als einzige Unbekannte verbleiben das Mikrophon und der zu messende Lautsprecher. Das Mikrophon charakterisiert sich durch seine Empfindlichkeit (in mV/Pa) und durch seinen Frequenzgang, der in der Mikrophon Kompensationsdatei abgelegt ist. Es bleibt somit als einziges unbekanntes Glied in der Meßkette das Meßobjekt.

In der Standardeinstellung *Ref: int* wird automatisch für die Referenzmessung eine interne Verbindung vom Endstufenausgang zum Eingang des Meßsystems hergestellt. Der Endstufenpegel wird dabei um 20 dB abgeschwächt. Die Eingangsempfindlichkeit des Meßsystems ist dazu unter *AD/DA Basic Settings* entsprechend (typ. 0 dBu) einzustellen oder die *Autorange* Funktion im *AD/DA Basic settings* Menu zu aktivieren.

Achtung: Für die Messung an aktiven Lautsprechern wird die Endstufe im Frontend nicht benötigt. Für diesen Fall ist die automatische Referenzmessung, welche die Endstufe mit einschließt, nicht absolut korrekt, so daß hier für die Referenzmessung auf *Ref: ext* umgeschaltet werden sollte. Die Meßschleife wird jetzt nicht mehr automatisch

geschlossen und es müssen über ein XLR-Kabel der entsprechende Ein- und Ausgang an der Frontplatte verbunden werden. Ansonsten ist die Vorgehensweise identisch.

Die folgende Tabelle zeigt alle Einstellungen im Menu `LS sensitivity-Reference and more` für die Referenzmessung bei Lautsprechermessungen.

AD/DA LS sensitivity Reference			
Mic sensitivity	z.B. 15 mV/PA		Mikrophonempfindlichkeit (ist im Datenblatt des Mikros zu finden)
Mic equalization	MIC-KOMP.SPK		Kompensationsspektrum für das Meßmikrophon (wird durch eine Vergleichs-messung mit einem Referenzmikro (z.B. B&K 4165 oder 4135) erstellt
Degree	14		Grad der Maximalfolge (für Lautsprecher 14 oder 15)
Exciter	MLS		Art des Anregungssignal MLS=Maximalfolge
Origin	intern oder file		Quelle des Anregungssignales - vorverzerrt: file - nicht vorverzerrt: intern
Signal file	C:\MAXIDAT\ ERDNUß14.DAT		Vorverzerrte Rauschfolgen ERDNUß14.DAT oder ERDNUß15.DAT
Level	-10 dB FS		Pegel in Bezug auf die fullscale Einstellung bei der Referenzmessung
Equalizing file	LSCO14.SPK		Dateiname für die Referenzmessung (wird automatisch eingestellt)
Mic preamp gain	0 dB		Verstärkung eines externen Mikrophonvorverstärkers (nur falls vorhanden, sonst

AD/DA LS sensitivity Reference			
			0 dB)
Dynamic range	50 dB		Maximale Kompensationsdynamik
Lower Cut Off	10 Hz		Untere Frequenzgrenze für die Kompensation
Upper Cut Off	22.05 kHz		Obere Frequenzgrenze für die Kompensation
Ref	Int		Referenz intern oder extern - passive Lautsprecher: int - aktive Lautsprecher: ext
Go for it ! ←			Start der Messung

Tabelle 17 Einstellung im Menu `AD/DA LS sensitivity Reference and more`

Als Resultat erscheint nach der Referenzmessung das bereits invertierte Spektrum auf dem Bildschirm, wie es in Abbildung 32 (li) dargestellt ist. Bei eingeschalteter Mikrokompensation wird die Meßdatei des Mikrophones mit in dieses Spektrum eingerechnet (siehe zweite Kurve). Als preiswerte Meßmikrophone eignen sich z.B. die Sennheiser KE4-211-2 Kapsel, die Monacor MCE-2000 Kapsel oder das Monacor ECM-30. Abbildung 32 (re) zeigt die Meßdatei der Sennheiser Kapsel, die den frequenzabhängigen Verlauf der Empfindlichkeit als Abweichung vom nominellen Wert (hier 15 mV/Pa bei 1 kHz) angibt.

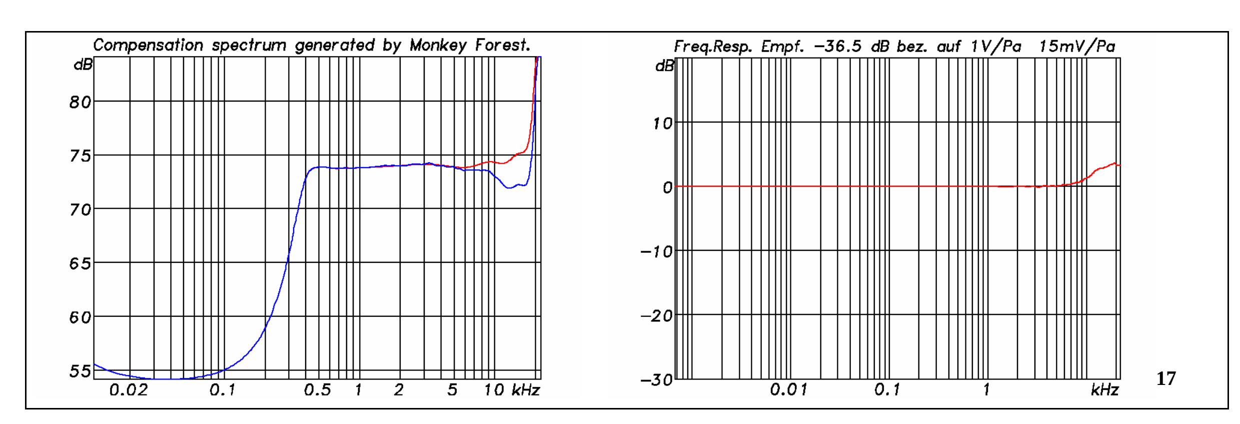


Abbildung 32 li: Referenzmessung bei vorverzerrter Rauschfolge mit und ohne Mikrokompensation
re: Kompensationsdatei für ein einfaches Sennheiser Mikro Typ: KE4-211-2

Achtung: Bei der Referenzmessung ist peinlich genau darauf zu achten, daß keine Verzerrungen oder andere Meßfehler durch eine falsche Pegeleinstellung am Meßsystem entstehen. Mögliche Fehler würden sich in allen weiteren Messungen als sehr störend auswirken !!! Die Autorange Funktion bietet hier eine gewisse Sicherheit gegen mögliche Fehler.

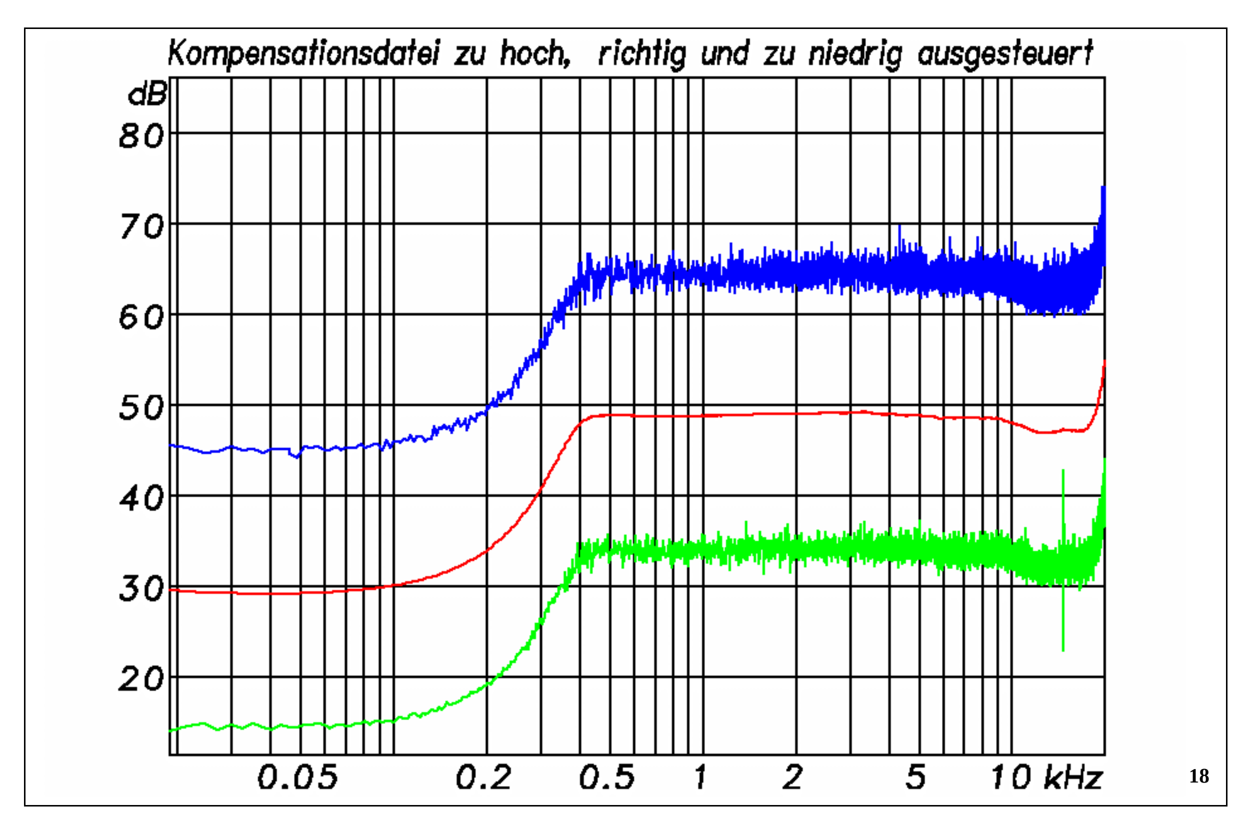


Abbildung 33 Referenzmessung bei zu hoher (Oben), bei richtiger (Mitte) und bei zu niedriger (Unten) Aussteuerung des Meßsystems

8.3.5 Pegelbetrachtung

Die Eingangsempfindlichkeit ist nur unter `AD/DA Basic Settings` bei *AD fullscale* einzustellen. Alternativ zur Einstellung von Hand kann auch die *Autorange* Funktion für die Eingangsempfindlichkeit eingeschaltet werden. Der Ausgangspegel kann im jeweiligen Meßmenü mit *Level* bezogen auf den Fullscale Wert des Ausgangs eingestellt werden. Dieser findet sich ebenfalls im Menu `AD/DA Basic Settings` unter *DA fullscale*. Beträgt der DA fullscale Wert beispielsweise 0 dBu und die Level Einstellung –10 dB, so bedeutet das einen Ausgangspegel von –10 dBu. Die Verstärkung der Endstufe sollte möglichst immer bei +20 dB belassen werden, da dieser Wert nicht von der Software erfaßt wird und bei Fehleinstellungen die Pegelbezüge verfälscht werden. Eine schnelle Anpassung des Ausgangspegels ist im entsprechenden `AD/DA` Menu über die *Level* Einstellung möglich. Nach einer Messung empfiehlt sich ein kurzer

Blick auf den Aussteuerungsbalken rechts unten auf dem Bildschirm, um bei Bedarf den Pegelbereich anzupassen.

	Passive Lautsprecher	Aktive Lautsprecher
Ausgangspegel am Meßsystem bei der Messung (DA fullscale 0 dBu)	-10 dBu (+20 dB von der Endstufe)	-10 dBu
Eingangsempfindl. am Meßsystem (AD fullscale)	-40..0 dBu oder Autorange	-40..0 dBu oder Autorange
Eingangsempfindl. am Meßsystem bei der Referenzmessung (AD fullscale)	0 dBu oder Autorange	0 dBu oder Autorange

Tabelle 18 Einstellungen der Eingangsempfindlichkeiten und Ausgangspegel für Lautsprechermessung

8.3.6 Lautsprechermessung

Nach den vorab genannten Vorbereitungen kann es nun tatsächlich zu einer ersten Frequenzgangmessung an einem Lautsprecher kommen. Für die ersten Messungen sollten sowohl die Fensterfunktion *(Window)* als auch die Glättungsfunktion *(Smooth)* abgeschaltet sein. Die Berechnung der Sensitivity und eine spätere Fensterung erwarten, daß unter *Mic-LS distance* die richtige Entfernung eingetragen ist. MF detektiert diesen Wert aus der Lage des Maximums der Impulsantwort automatisch, wenn die Messung nicht einfach mit ↵ sondern mit `Ctrl`↵ gestartet wird. Diese Vorgang ist natürlich nur einmal erforderlich, solange der Aufbau aus Mikrophon und Lautsprecher nicht verändert wird. Die Laufzeit, die durch die Entfernung vom Lautsprecher zum Mikrophon entsteht wird nur dann automatisch entsprechend der eingestellten Distanz kompensiert, wenn die Option *Delay shift* aktiviert ist. Bei einer gleichzeitigen Fensterung kann es dann zu einer Überkompensation kommen, wenn die vor dem Maximum gelegenen Anteile der Impulsantwort an das hintere Ende des Zeitsignales rücken und dort vom Fenster abgeschnitten werden. Abhilfe kann damit geschaffen werden, wenn ein geringfügig kleinerer Wert als der akustisch detektierte von Hand eingetragen wird.

Bei einer mehr oder weniger freien Aufstellung im Raum könnte das Ergebnis dann ähnlich dem Beispiel in Abbildung 34 sein. Der Frequenzgang der Box ist grundsätzlich zu erkennen aber von einem stark unruhigen Verlauf überlagert. Verursacht wird dieses

durch reflektierten Schall von Wänden, Decke, Boden etc., der später als der Direktschall vom Lautsprecher eintrifft, sich mit diesem überlagert und zu Interferenzeffekten führt. Im Zeitbereich läßt sich dieses besser beobachten. Mit der Tastenkombination `Ctrl U` kann in den Zeitbereich umgeschaltet und die Impulsantwort betrachtet werden. Abbildung 35 zeigt die zum Frequenzgang aus Abbildung 34 gehörige Impulsantwort. Nach dem ersten Direktschall und dem ausklingen der Impulsantwort des Lautsprechers, folgen ab ca. 8 ms eine Reihe Reflexionen, die als kleine scharfe Spitzen zu erkennen sind. Von der ausschwingenden Impulsantwort des Lautsprechers sind die Reflexionen durch ihre spitze Form zu unterscheiden. Spitze Formen werden nur durch hochfrequente Anteile erzeugt, die in der Lautsprecherimpulsantwort früh abgeklungen sind und nach ca. 5 ms nicht mehr auftauchen sollten. In der Beispielmessung soll nun ein Fenster so gesetzt werden, daß alle Anteile in der Impulsantwort nach 8 ms ausgeblendet werden.

AD/DA LS sensitivity			
Mic preamp gain	0 dB		Bei externem Mikrophon-Vorverstärker ist hier dessen Gain einzutragen
Correct by	0 dB		z.B. –6 dB bei Halbraummessungen
LS impedance	8 Ohm		Nominelle Impedanz des Lautsprechers (im Zweifelsfall zuerst nachmessen)
Mic-LS distance	2 m		Entfernung vom Messmikrophon zur Lautsprecherfront (Kann auch automatisch über `detect distance` bestimmt werden) Bitte Kap. 8.5 beachten !!
Mode	single		Nur eine einzelne Messung oder Dauermessungen
Averaging	4		Bei starken Störgeräuschen

AD/DA LS sensitivity			
			evtl. erhöhen
Level	-12 dBu	⌨	Ausgangspegel am Line Ausgang Achtung: Endstufe +20 dB
Build imp. resp.	Post comp	⌨	Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen und weiter verarbeiten (siehe auch 8.5) Pre = Impulsantwort des gesamten Meßstrecke zur Fensterung verwenden Post = Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen und weiter verarbeiten, d.h. nur die Impulsantwort des Meßobjektes für die Fensterung verwenden
Delay shift ≤	No	⌨	Laufzeit durch die Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikro automatisch kom-pensieren (siehe auch 8.5)
Window	No	⌨	Fenster zunächst immer abschalten und erst die Impulsantwort sichten
Equalizing File	Lsco14.spk	⌨	Datei mit der Referenzmessung
Smooth	No	⌨	Glättung zunächst immer abschalten und erst den Frequenzgang begutachten
Dynamic Range	50 dB	⌨	50 dB ist der Standardwert

AD/DA LS sensitivity			
On top	110 dB	🖮	Abhängig vom erwarteten Meßbereich einstellen
Reference and more ...			Zu Beginn einer Meßreihe ausführen
Go for it ! ←			Start der Messung

Tabelle 19 Einstellung im Menu *AD/DA LS sensitivity*

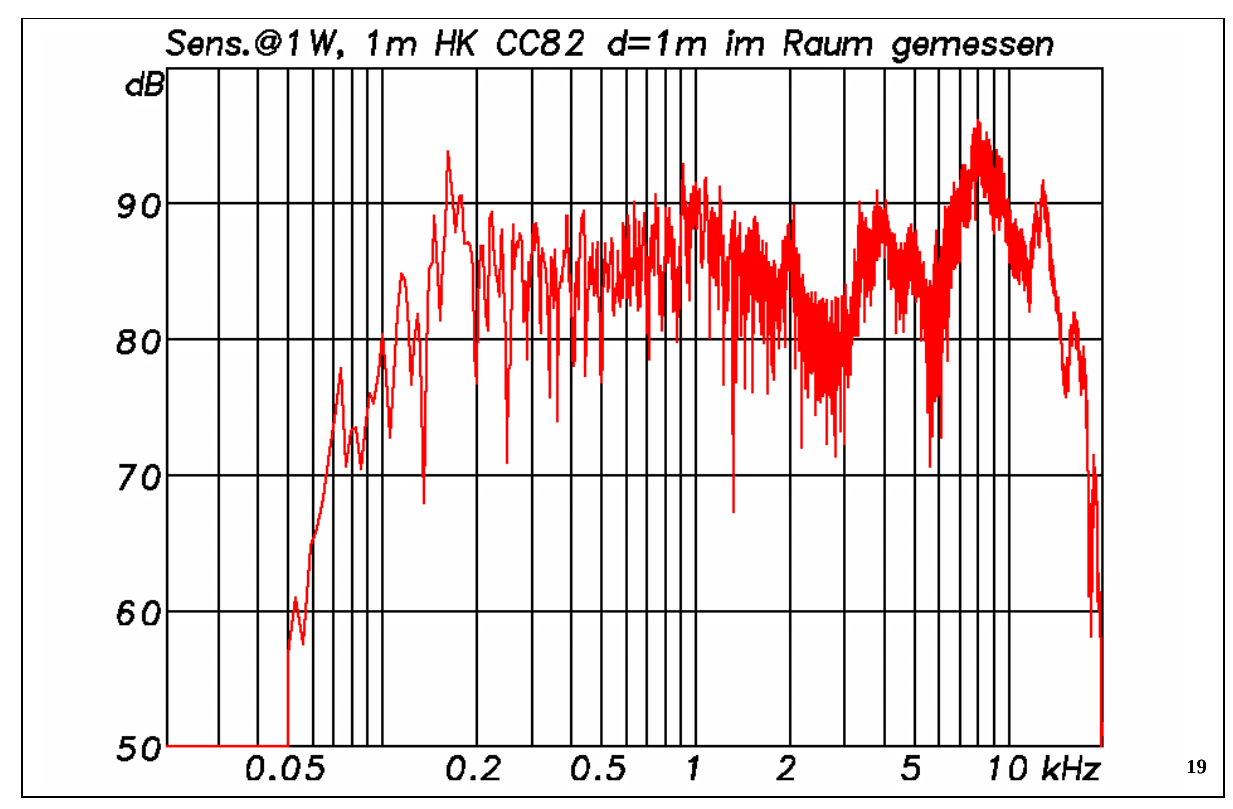


Abbildung 34 Ergebnis einer ersten Frequenzgangmessung im Raum mit ausgeprägten Interferenzeffekten

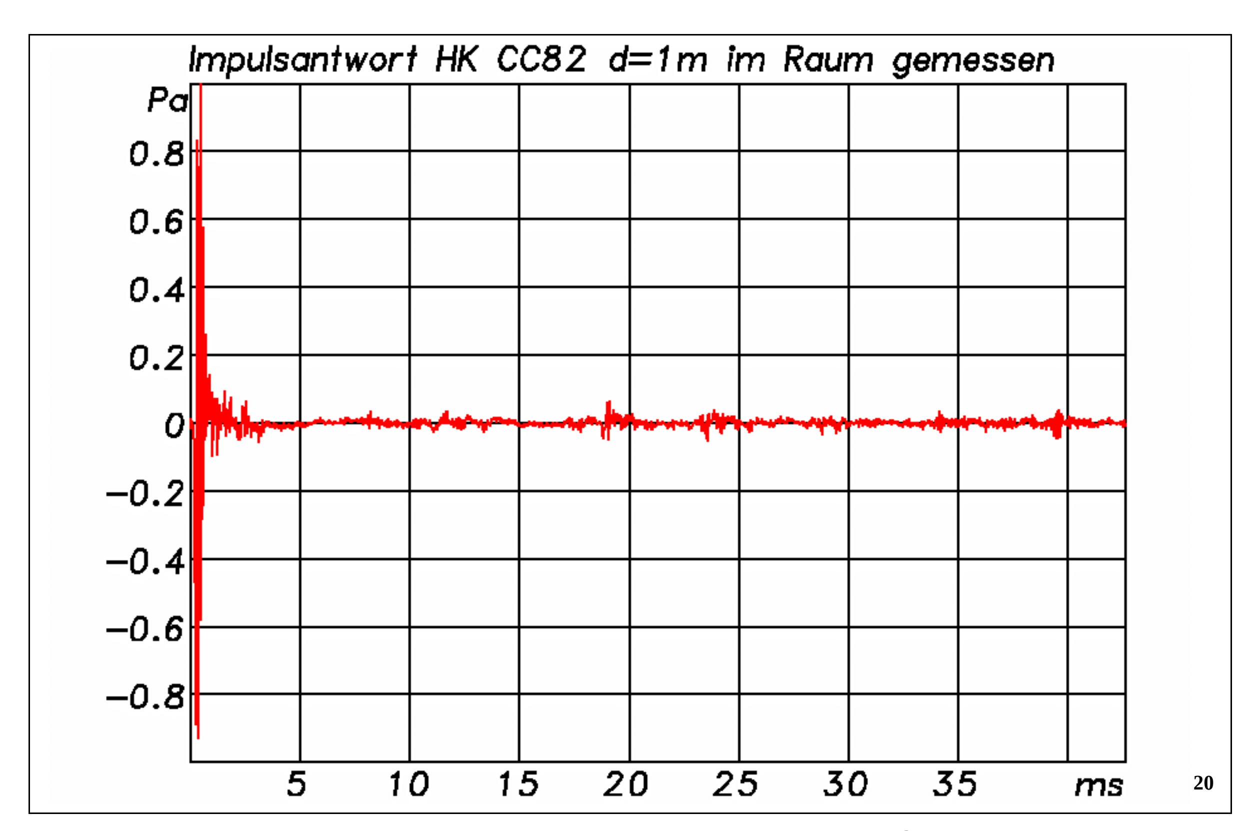


Abbildung 35 Impulsantwort einer Messung im Raum mit Reflexionen

Das hier zu verwendende Fenster sollte unsymmetrisch und in der Form so sein, daß vom Beginn der Impulsantwort angefangen zunächst alles zu 100% durchgelassen wird und ab 8 ms eine vollständige Ausblendung erfolgt. Das Ausblenden sollte dabei nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich ab ca. 6 ms erfolgen. Zu diesem Zweck werden die beiden Cursor in der Impulsantwort so plaziert, daß vor dem ersten Cursor bei 6 ms der 100% Durchlaßbereich liegt, dann zwischen den beiden Cursor ausgeblendet wird und nach dem zweiten Cursor bei 8 ms nichts mehr durchgelassen wird. Sind beide Cursor in der Impulsantwort plaziert, so genügt ein Tastendruck (`W=Window`) und ein Fenster ist wunschgemäß eingerichtet. Schaltet man jetzt mit `Ctrl M` in die Betragsdarstellung des Frequenzbereiches zurück und geht erneut in das Meßmenü *`LS-Sensitivity`*, so ist hier die *Window* Option aktiviert und das Fenster genau in der gewünschten Form definiert. Wirksam wird das Fenster bei der nächsten Messung, die jetzt einfach mit ↵ gestartet werden kann. Das Resultat für den Beispielaufbau zeigt Abbildung 37. Die Interferenzeffekte sind weitgehend verschwunden und der Frequenzgang ähnelt nun deutlich mehr dem eines Lautsprechers. Mit einer Umschaltung in den Zeitbereich mit `Ctrl U` ist die Fensterung in der Impulsantwort (siehe Abbildung 36) zu erkennen, wo jetzt die Reflexionen ausgeblendet sind. Leider ist durch die Fensterung auch die Information im Bassbereich abhanden gekommen, was an der früh und ungewöhnlich geradlinig abfallenden Kurve unterhalb von 200 Hz zu erkennen ist. Mit einer Faustformel kann dieser Effekt abgeschätzt werden, die besagt, daß das Resultat im Frequenzbereich

oberhalb der Frequenz Gültigkeit hat, deren Wellenlänge der halben Fensterlänge entspricht. Für eine Fensterlänge von 8 ms liegt die Grenze damit bei 250 Hz.

Soll das Fenster auf eine bereits bestehende Messung nachträglich angewandt werden, so findet sich im *Edit* Menü zur Signalbearbeitung eine Fensterfunktion für Zeitsignale unter *Apply Window*. Befindet man sich noch im Frequenzbereich, d.h. es ist ein Frequenzgang dargestellt, so muß zunächst über eine inverse Fourier-Transformation (IFFT) die Impulsantwort berechnet werden. Die IFFT verlangt nach 2^n+1 Werten zwischen den Cursorn, welche dann an den äußersten Enden des Spektrums bei 0 Hz und der halben Abtastrate (22k05 bei 44k1) stehen. Im Frequenzbereich springen die Cursor automatisch an diese Position über die *Entire* Funktion im *Display* Menü oder über die Tastenkombination ↑E. Die Anzahl der Frequenzlinien zwischen den Cursorn ist unten rechts am Bildschirm unter *total bins* (z.B.: 8193) abzulesen. Die IFFT kann anschließend über das *Trans* Menü und *IFFT* oder direkt über die Taste I ausgeführt werden.

Die Darstellung schaltet danach automatisch in den Zeitbereich und die Impulsantwort erscheint auf dem Bildschirm. Hier kann ebenfalls über die Tastenkombination ↑E die Impulsantwort in ihrer gesamten Länge sichtbar gemacht werden. Die Fensterung läuft hier ähnlich ab, wie bereits beschrieben, indem die beiden Cursor am Anfang und Ende des Bereiches der gewünschten Ausblendung plaziert werden und dann die Fensterung mit *Apply Window* ausgeführt wird. Eine Standardfensterfunktion ist das Blackman-Harris 3-Term, das hier unsymmetrisch rechtsseitig eingesetzt wird. Die Einstellung lauten *Slope=right* und *Range=cursor*.

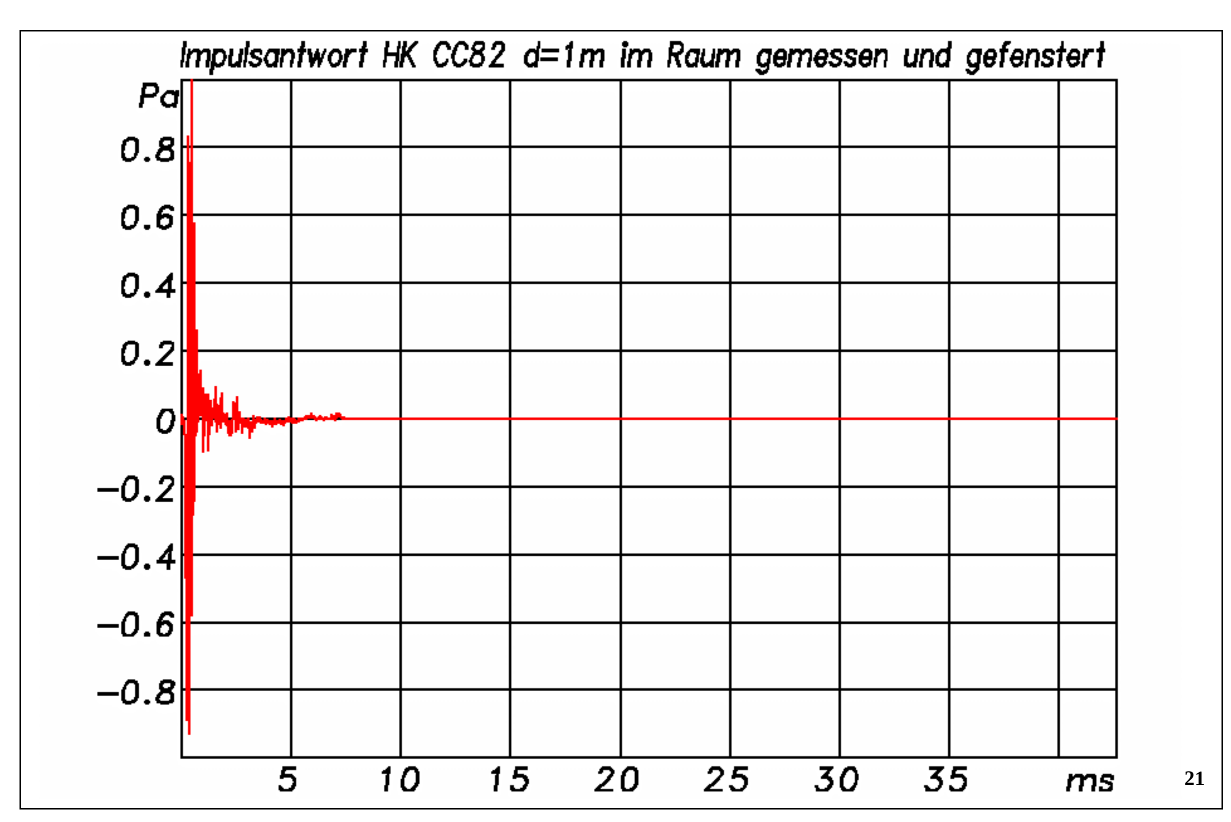


Abbildung 36 Impulsantwort mit Fensterung nach 8 ms

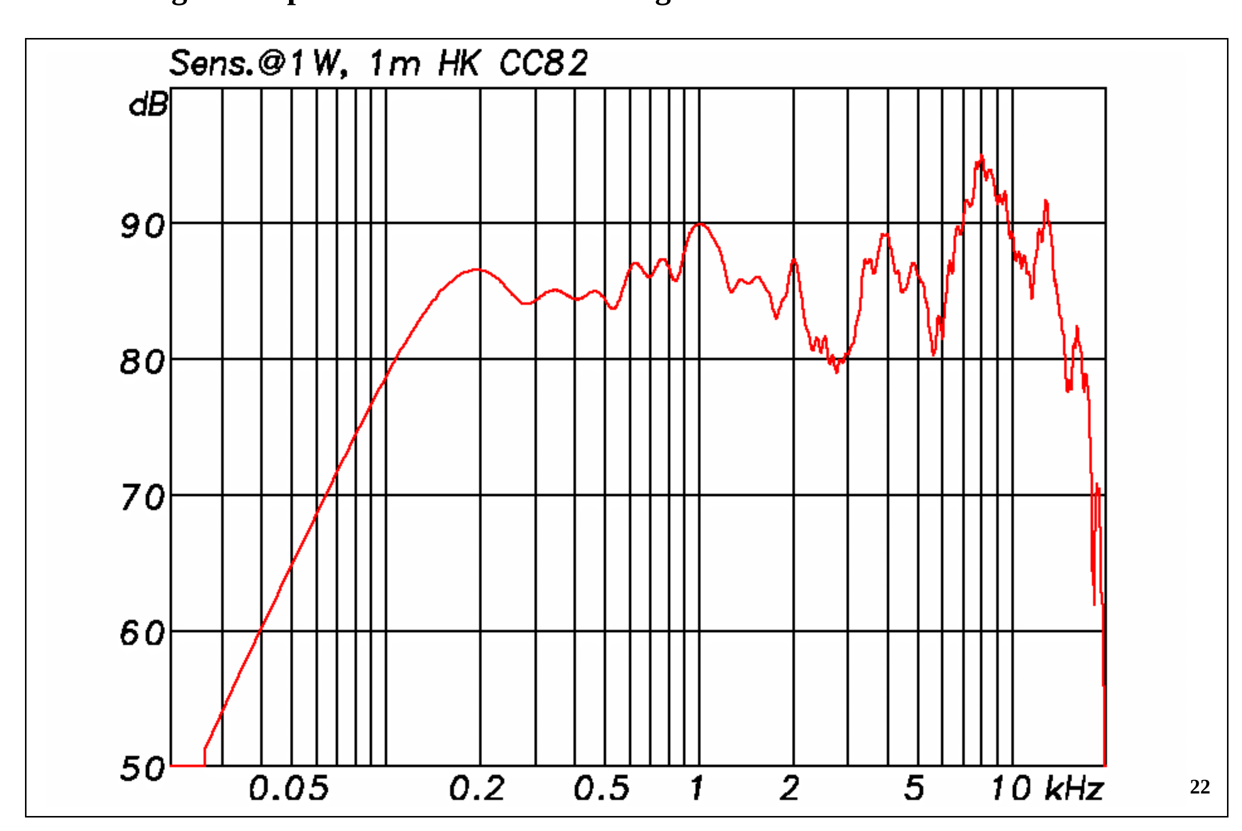


Abbildung 37 Frequenzgang aus der gefensterten Impulsanwort

Nachdem der Vorgang der Fensterung abgehandelt ist, bleibt unvermeidlich die Problematik der mangelnden Auflösung im tieffrequenten Bereich. Für Frequenzen deren Wellenlänge groß gegenüber den Abmessungen des Strahlers ist, bietet sich die Möglichkeit einer ergänzenden Nahfeldmessung. Für die Nahfeldmessung wird das Messmikrophon sehr nahe (≈0,5cm) an die Membran gebracht, so daß der Direktschall stark dominierend gegenüber allen Reflexionen ist. Die Eingangsempfindlichkeit ist bei dieser Messung wegen des wesentlich höheren Pegels direkt vor der Membran entsprechend anzupassen, so daß keine Übersteuerung auftritt. Das Umfeld um den Meßaufbau spielt für diesen Aufbau keine Rolle. Leider kann diese praktische Meßmethode nur für sehr tiefe Frequenzen angewandt werden, wenn die Membran noch als Einheit schwingt, keine Partialschwingungen auftreten und Kanteneffekte an Gehäusen etc. noch keine Bedeutung haben. Ebenso kann über die Sensitivity und den Laufzeitbezug des Lautsprechers keine definitive Aussage gemacht werden. Dieser Bezug kann aber anschließend über eine Kombination einer Nah- und Fernfeldmessung hergestellt werden. Die Fernfeldmessung liefert den Pegel- und Laufzeitbezug und die Nahfeldmessung die nötige Information in Bassbereich.

Das folgende Beispiel zeigt die Nahfeldmessung am Beispiel einer kleinen Bassreflexbox. Da auch die Tunnelöffnung ihren Anteil zur Abstrahlung im Bassbereich beiträgt, müssen zunächst der Tunnel und die Membran einzeln im Nahfeld gemessen werden. Beide Dateien werden getrennt abgespeichert und anschließend aufaddiert. Vorher ist noch eine flächenbezogene Gewichtung der beiden Dateien zu berechnen, die sich aus der Wurzel der Flächenverhältnisse der Strahlerflächen berechnet. Für den Tunnel wird die tatsächliche Öffnungsfläche zu Grunde gelegt. Für die Membranfläche ist der Radius so zu messen, daß die Sicke zur Hälfte mit einbezogen wird. Unabhängig von der Membranform wird immer eine ebene Kreisfläche mit dem entsprechenden Radius berechnet und nicht die tatsächliche Membranoberfläche, z.B. bei einer Konus- oder Kalottenmembran. Für die Beispielbox ist die Membranfläche 227 cm² und die Tunnelfläche 50 cm² groß, woraus sich ein Verhältnis von $(50/227)^{½}$ = 0.47 entsprechend –6.57 dB. Die Tunnelmessung ist daher mit diesem Faktor zu multiplizieren. Wie auch bei jeder anderen Editier-Funktion für Messergebnisse sind die Cursor an den Rändern des Bereiches zu plazieren, der bearbeitet werden soll. Für diesen Fall soll die Multiplikation mit einem Faktor das gesamte Spektrum der Tunnelmessung betreffen, so daß die Cursor mit ↑E an die äußersten Enden des Spektrums gesetzt werden. Im *Edit* Menü kann dann über *Multiply* der gewünschte Faktor eingegeben werden. Anschließend ist die Datei natürlich erneut abzuspeichern und die ausgeführte Pegelveränderung zur besseren Übersicht möglichst in der Kommentarzeile der Datei einzutragen. In die Editierfunktion der Kommentarzeile wechselt man mit der Taste K. Im nächsten Schritt können die beiden Nahfeldmessungen addiert werden. Eine Datei wird dazu geladen und die zweite

über die `Read-Block` Funktion im `Edit` Menu addiert. Hinter diesem Vorgang verbirgt sich ein grundsätzlicher Prozeß bei MF, mit dem zu einer geladenen Datei, die auch schon mehrere Kurven enthalten kann, andere Dateien hinzugefügt werden. Dieses Hinzufügen kann bedeuten, daß die neuen Dateien als weitere Kanäle eingefügt oder aber auch mit den bereits geladenen Kanälen mathematisch verknüpft, also z.B. addiert, werden. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die Einzelmessungen vor Membran und Tunnel und Abbildung 40 die Summe der beiden Kurven. Achtung: Bei der Addition ist immer die komplexe *add* und nicht die *add mag* Funktion anzuwenden, die nur die Beträge aufaddiert. Das Resultat ist sodann als Nahfeldmessung in einer neuen Datei abzuspeichern und möglichst auch mit einem entsprechenden Kommentar zu versehen.

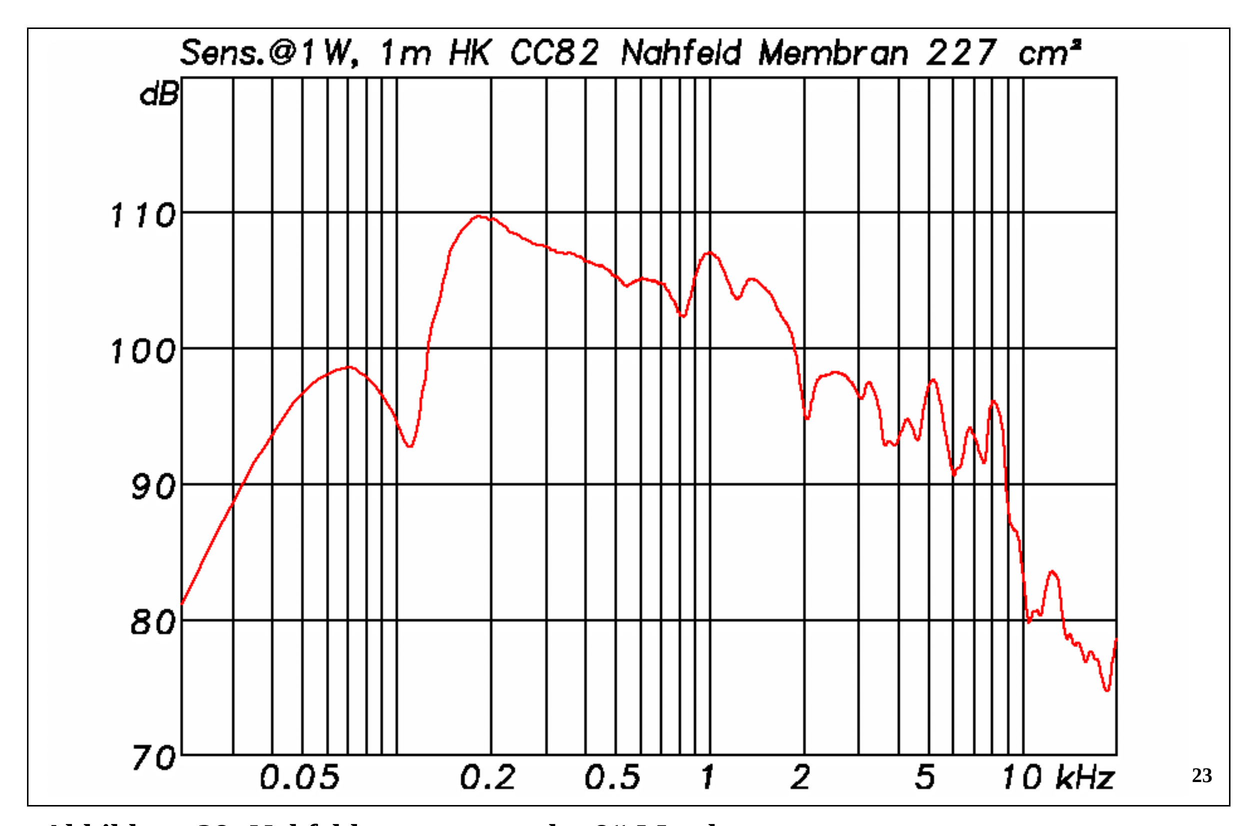


Abbildung 38 Nahfeldmessung vor der 8“-Membran

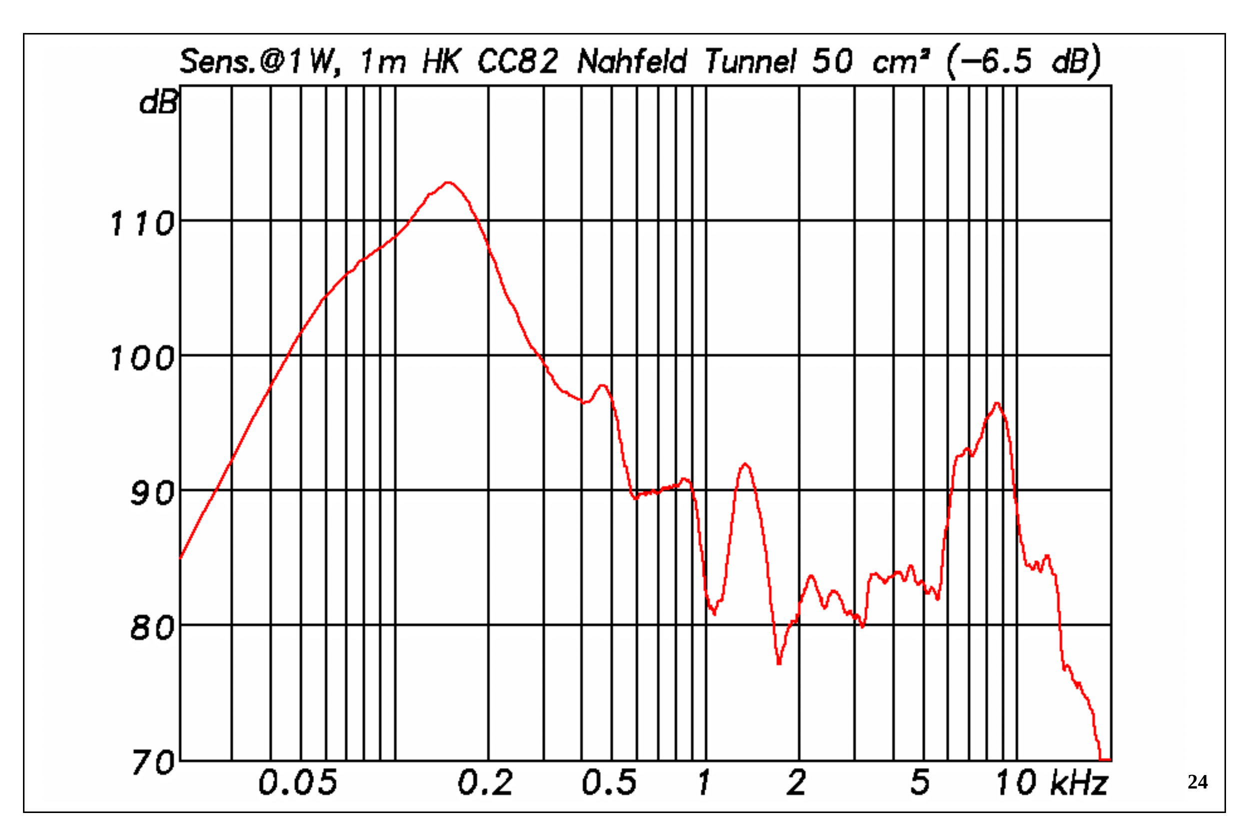


Abbildung 39 Nahfeldmessung vor dem Tunnel

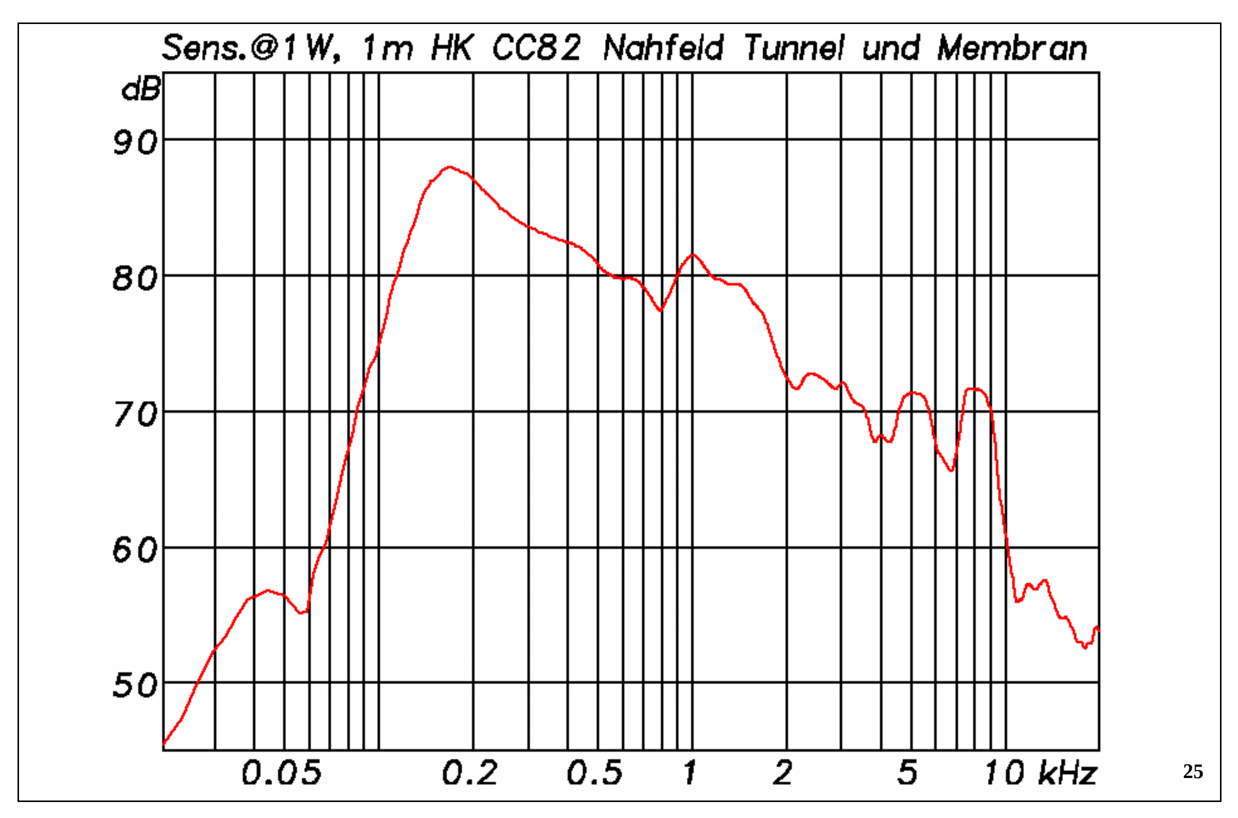


Abbildung 40 Summe der Nahfeldmessungen mit Flächengewichtung

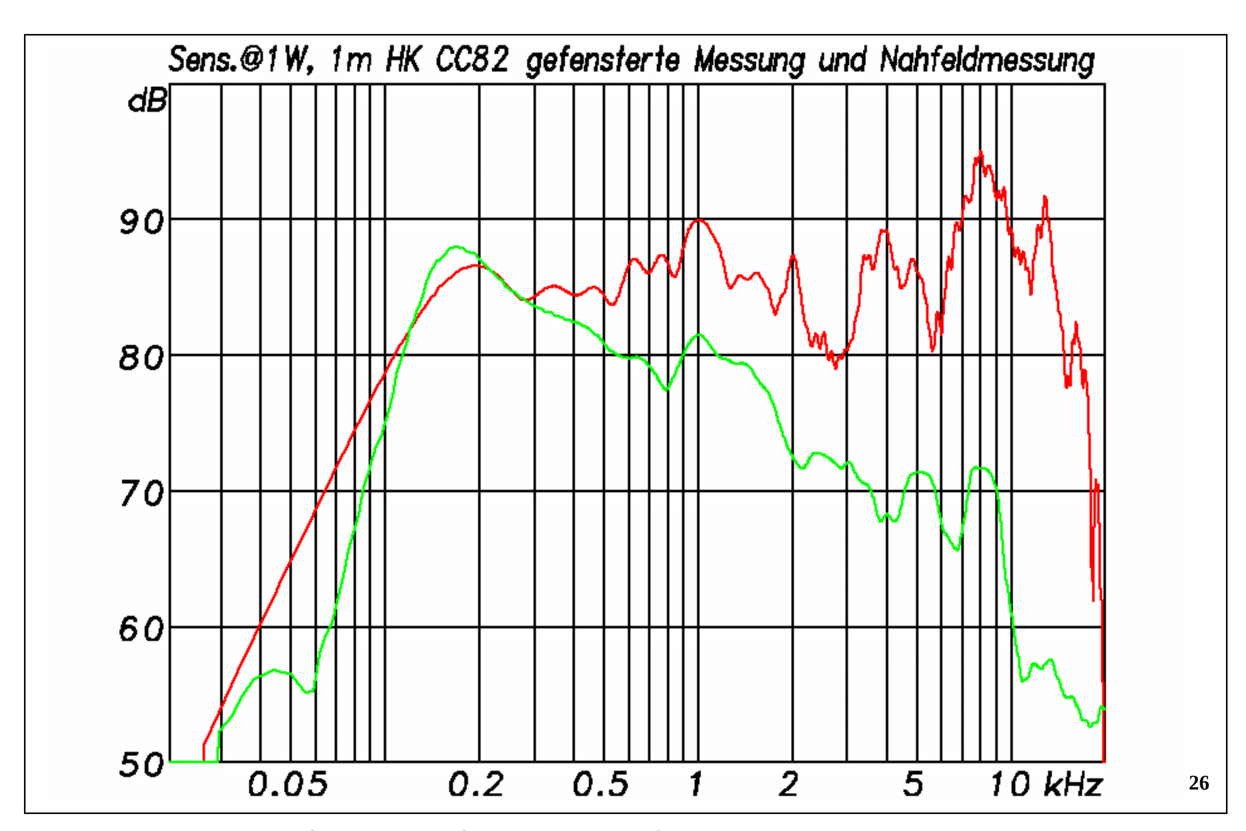


Abbildung 41 Nahfeld und gefensterte Fernfeldmessung

Im letzten Schritt ist die frisch erstellte Nahfeldmessung noch mit der Fernfeldmessung zu kombinieren. Die Kombination von zwei Dateien sieht dabei so aus, daß eine Datei, und zwar die zuerst geladene, den Bereich von der Kombifrequenz bis zur höchsten Frequenz abdeckt und die andere zweite Datei den Frequenzbereich von 0 bis zur Kombifrequenz. Die zuerst geladene Datei gibt den Pegel- und Laufzeitbezug vor. Für die Lautsprechermessung wird somit zunächst die Fernfeldmessung geladen. Im zweiten Schritt wird über die `Read-Block` Funktion die Nahfeldmessung hinzu geladen. Im *Modus combi* kann die gewünschte Kombifrequenz eingestellt werden. Welche Frequenz günstig ist, kann gut beurteilt werden, wenn zunächst beide Dateien, die Nah- und Fernfeldmessung, geladen und bei einer Frequenz auf einen Wert normiert werden. In Arbeitsschritten bedeutet das, zunächst über das Dateimenü die Fernfeldmessung laden, dann über die `Read-Block` Funktion im *Mode new channels* die Nahfeldmessung als zweiten Kanal laden und über die `Normalize` Funktion im `Edit` Menu die beiden Kurven an der Stelle des aktiven Cursors auf einen Wert normieren. Die Kombifrequenz sollte in einem Bereich weiträumiger Übereinstimmung im tendenziellen Verlauf der beiden Kurven liegen. Abbildung 41 zeigt die Beispielmessungen im Fern- und Nahfeld, wo ein günstiger Frequenzbereich für die Kombination zwischen 200 und 300 Hz zu erkennen ist. Letztendlich wurde die Fernfeld-Nahfeldkombination bei 220 Hz durchgeführt, dessen Ergebnis in Abbildung 42 abgebildet ist. Der Vorgang ist damit abgeschlossen. Was hier anfänglich kompliziert anmutet, wird recht schnell zur Routine.

Entscheidend ist es dabei, mit der Zeit eine möglichst große Erfahrung mit Lautsprechermessungen zu sammeln, um sinnvolle Ergebnisse und den Gültigkeitsbereich einer Messung sicher beurteilen zu können. Eine Grundregel ist, daß plötzliche Sprünge und sich schnell abwechselnde Minima und Maxima in der Regel Artefakte des Meßaufbaues sind und nicht auf den Lautsprecher zurückgeführt werden können.

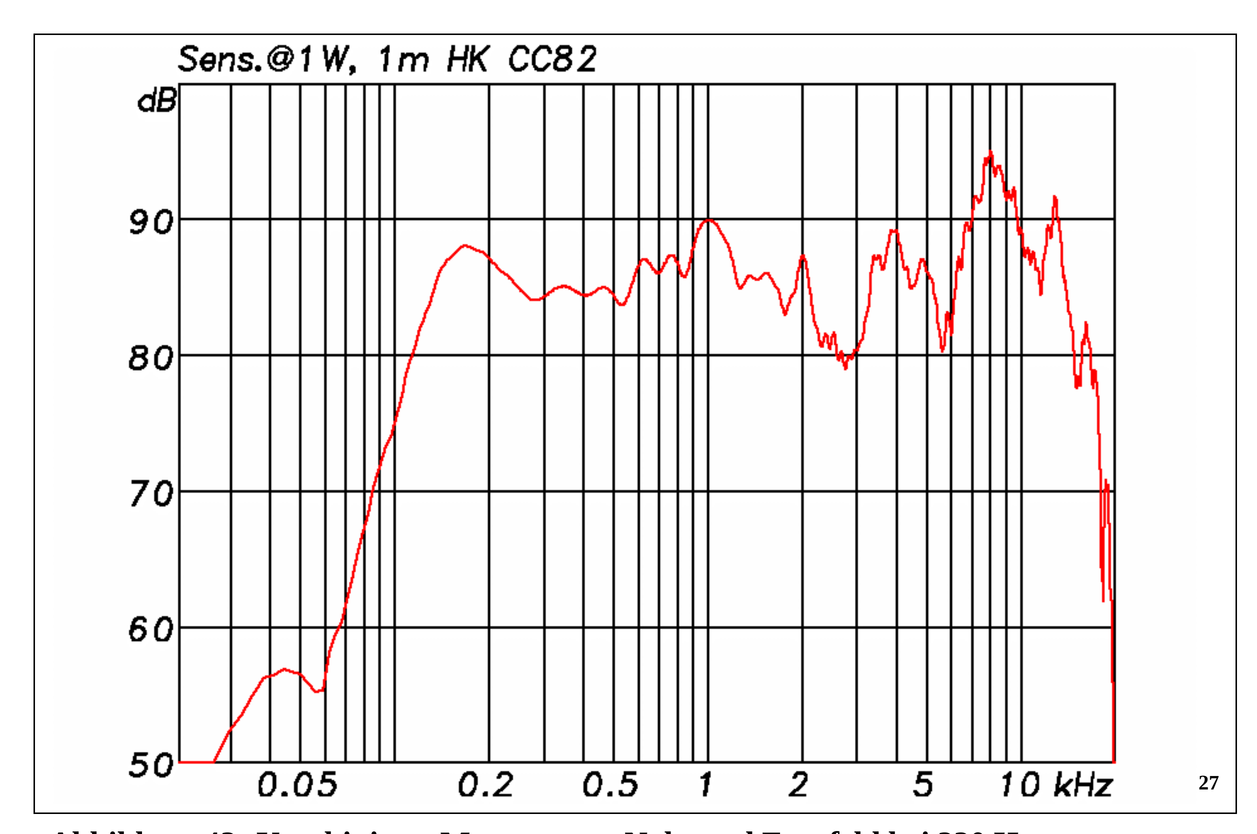


Abbildung 42 Kombinierte Messung aus Nah- und Fernfeld bei 220 Hz

8.4 Impuls- und Sprungantworten messen

Während Frequenz- und Phasengang als Größe über der Frequenz aufgetragen sind, zeigt die Sprungantwort die Reaktion des Lautsprechers auf einen Spannungssprung. Der Schalldruckverlauf wird aufgezeichnet und über der Zeitachse aufgetragen. Ähnliches gilt für die Impulsantwort, wo die Reaktion des Lautsprechers auf einen sehr kurzen Spannungsimpuls beobachtet wird. Alle drei Darstellungsweisen, d.h. der komplexe Frequenzgang mit Phaseninformation, die Impulsantwort und die Sprungantwort lassen sich ohne Verluste ineinander überführen und beinhalten alle die absolut identische Information über das zu beschreibende System. Mathematisch betrachtet errechnet sich die Impulsantwort über eine inverse Fouriertransformation aus dem komplexen Frequenzgang und die Sprungantwort über eine zeitliche Integration aus der Impulsantwort. Umgekehrt ist die Impulsantwort durch Differenzieren aus der Sprungantwort zu berechnen und der komplexe Frequenzgang über eine Fouriertransformation aus der Impulsantwort. Ähnlich einfach lassen sich nach erfolgter Messung auch alle Formen der Darstellung im Frequenz- oder Zeitbereich erzeugen. Der normale Meßablauf sieht vor, daß aus dem gesampelten Signal bei der Messung zunächst die Impulsantwort und dann das komplexe Frequenzspektrum errechnet wird. In einem weiteren Verarbeitungsschritt wird dann das Frequenzspektrum mit dem Kompensationsspektrum multipliziert. Die vorher ermittelte Impulsantwort ist daher zunächst noch nicht kompensiert und zeigt daher auch nicht das ausschließliche Verhalten des Meßobjektes sondern von der gesamten Meßstrecke, die mehr oder weniger stark voneinander abweichen können. Sobald die Option *Build imp res.* im Meßmenu auf *post comp* geschaltet ist, wird die Impulsantwort anschließend noch einmal neu aus dem kompensierten Frequenzspektrum berechnet. Mit den Tastenkombinationen `Ctrl M` für Betragsdarstellung, `Ctrl P` für Phasendarstellung und `Ctrl U` für Impulsantwort kann anschließend zwischen den verschiedenen Darstellungsebenen hin- und her geschaltet werden. Für die Darstellung der Sprungantwort kann im Zeitbereich bei Darstellung der Impulsantwort im *`Edit`* Menu unter *`Integrate`* die Berechnung aufgerufen werden. Abhängig von Gesamtlänge des Zeitsignales ist in der Darstellung der Impuls- oder Sprungantwort zunächst nur wenig zu erkennen. Zu einer genaueren Betrachtung empfiehlt es sich, den aktiven Cursor in die Nähe der Sprungstelle oder des Impulsanfangs zu bewegen und anschließend die Darstellung mit den + und – Tasten nach Bedarf zu vergrößern bzw. zu verkleinern. Die folgenden Beispiele in Abbildung 43 bis Abbildung 46 zeigen den Amplituden- und Phasenverlauf von drei Beispielsystemen und die zugehörigen Impuls- bzw. Sprungantworten.

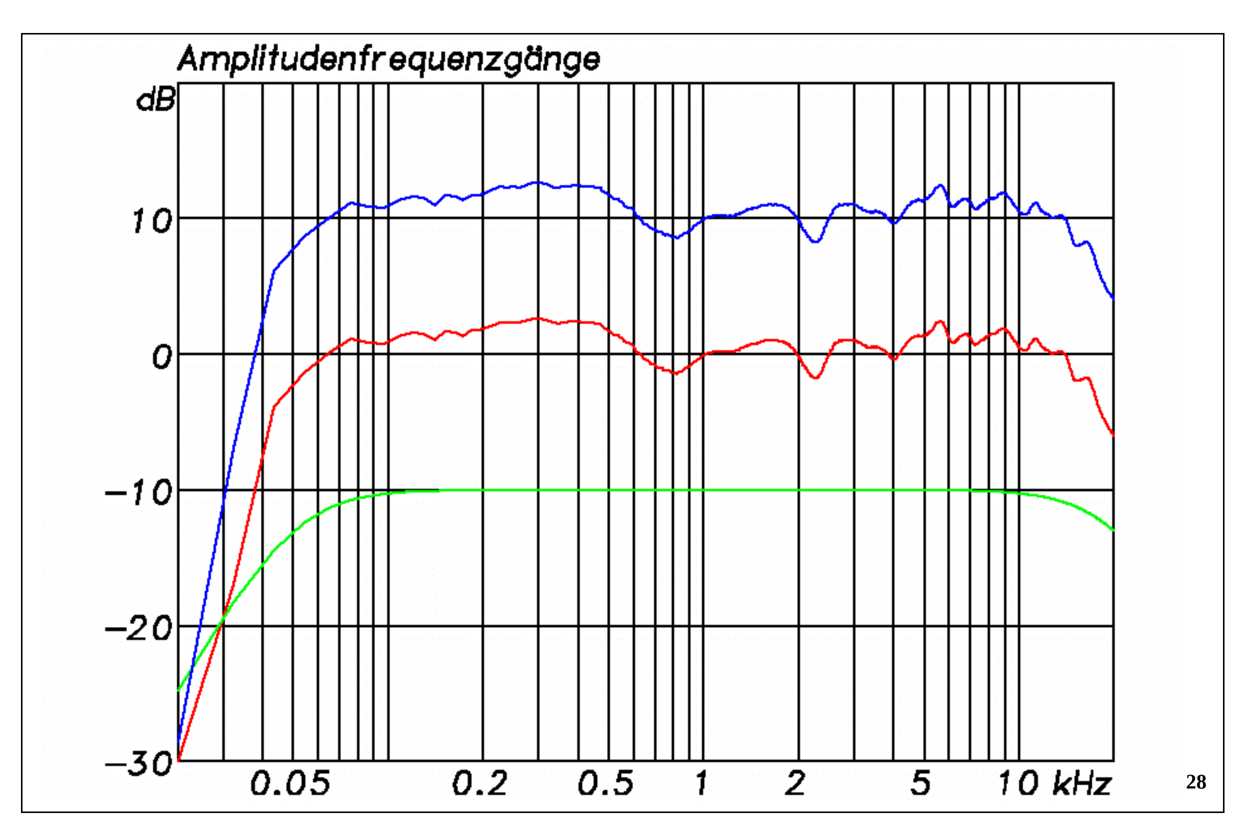


Abbildung 43 Amplitudenfrequenzgang drei verschiedener Lautsprecher

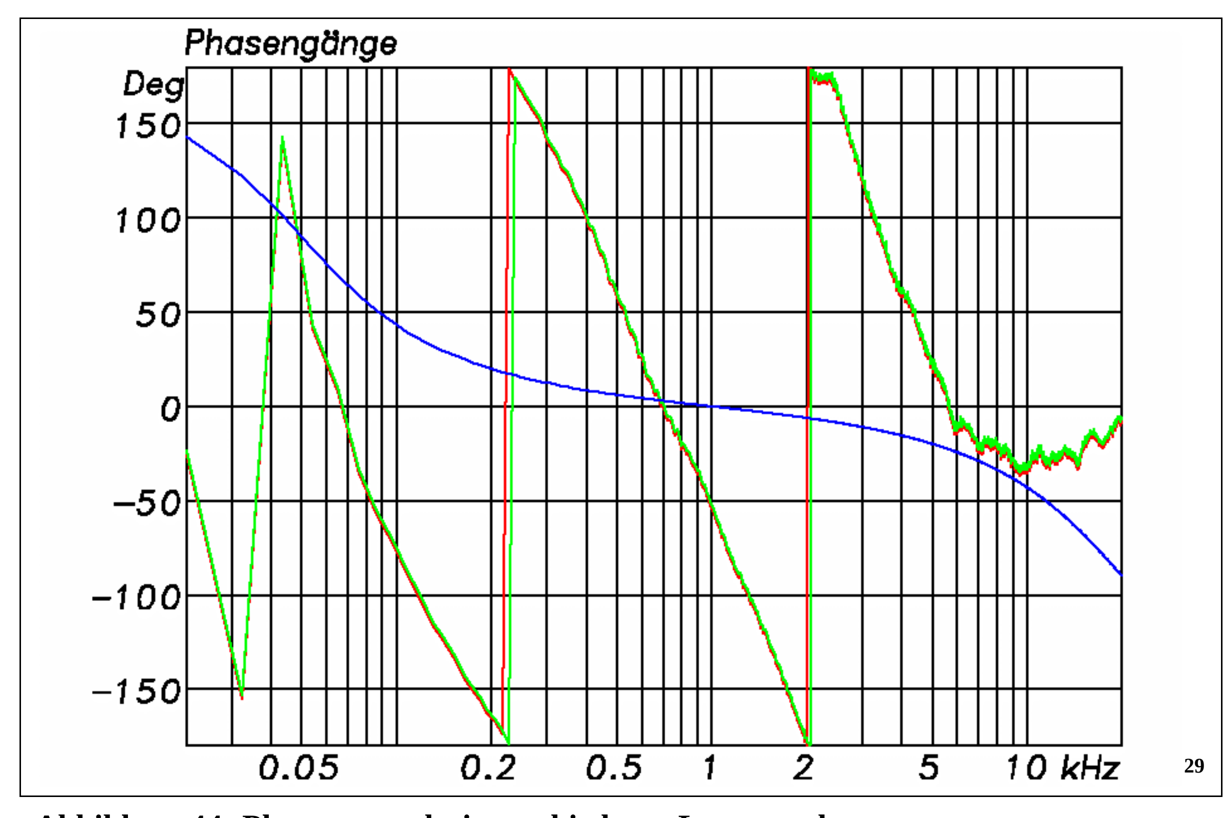


Abbildung 44 Phasengang drei verschiedener Lautsprecher

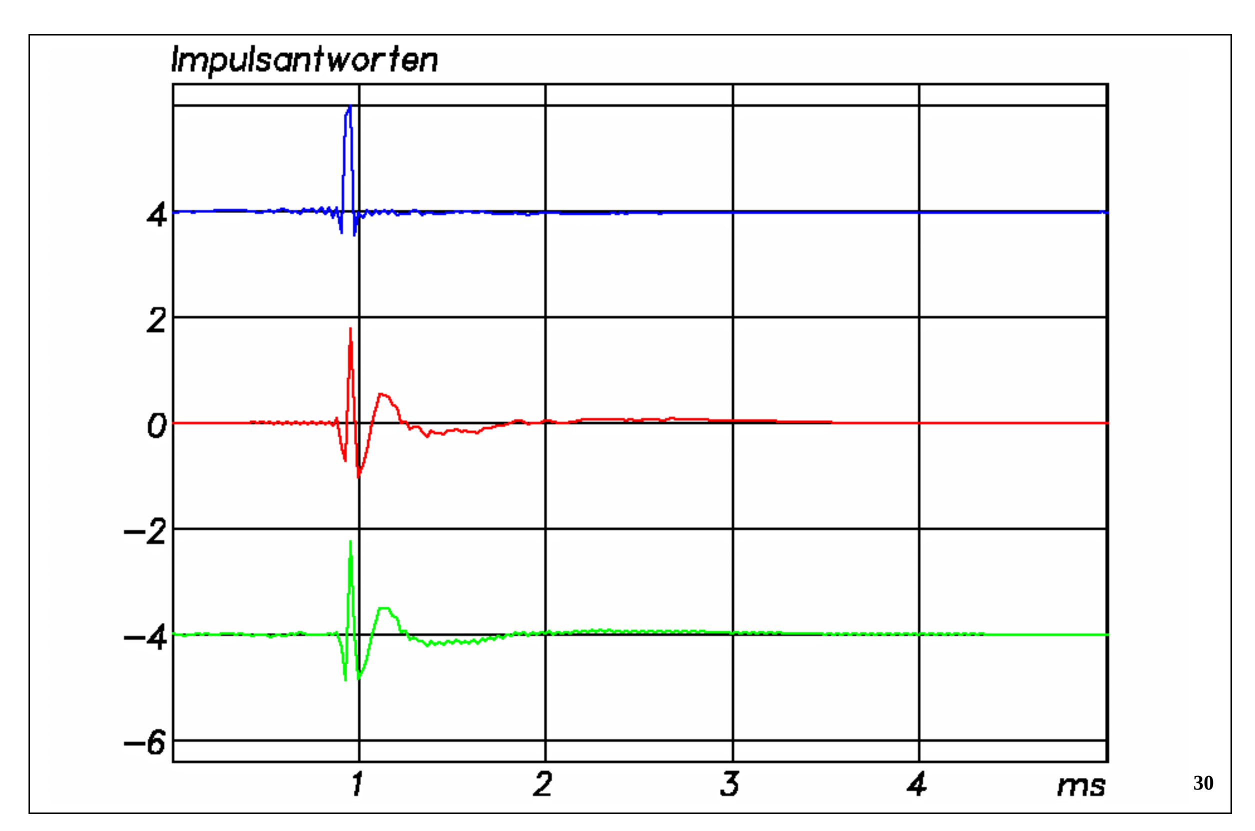


Abbildung 45 Impulsantwort drei verschiedener Lautsprecher

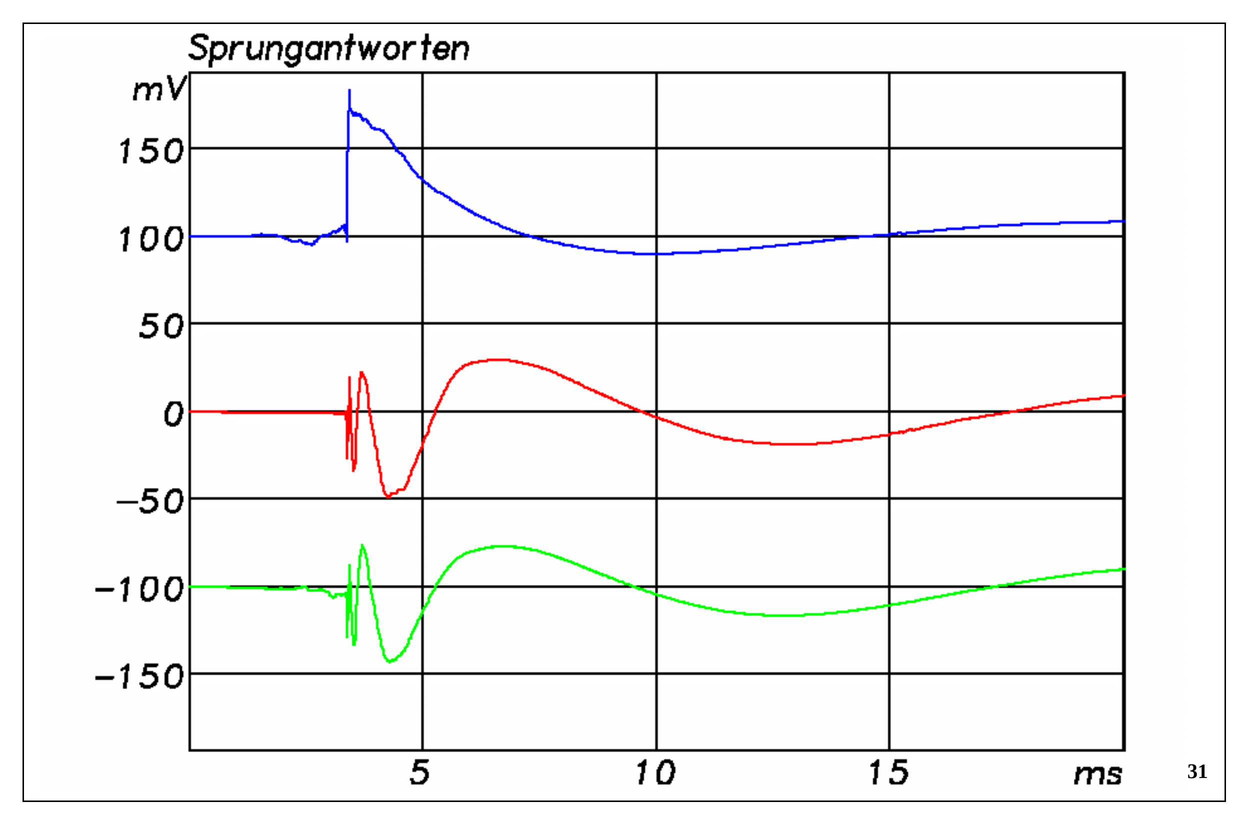


Abbildung 46 Sprungantwort drei verschiedener Lautsprecher

8.5 Die Optionen Pre- und Post-comp und Delay shift für Impulsantworten

Alle Meßfunktionen mit Referenzdateien für Frequenzgangmessungen, Lautsprecherempfindlichkeit, Polarmessungen etc. verfügen über die schaltbare Option *Build Impulse Response pre-* oder *post-comp*. Zur Veranschaulichung dieser Funktion muß zunächst der Ablauf eines Meßvorganges erläutert werden. Nach der Auswahl des Anregungssignales wird im ersten Schritt mit diesem Signal eine Referenzmessung oder Eigenmessung des Meßsystems ausgeführt, deren Resultat im Kompensationsfile in Form eines komplexen Frequenzganges abgespeichert wird. Für eine Polarmessung mit aktivierter *Normalize to 0°* Option ist die Frequenzgangmessung auf der Mittelachse die Referenzmessung. Die spätere Kompensation mit dieser Referenzdatei korrigiert nicht nur den Frequenz- und Phasengang, sondern kompensiert auch die Laufzeit des Meßsystems bzw. der Meßstrecke.

Eine Messung in der Einstellung pre-comp bzw. post-comp läuft über alles betrachtet wie in Tabelle 20 ab.

Besonderer Beachtung bedarf hier der Zusammenhang zwischen den Laufzeitkompensationen und der Fensterung der Impulsantwort. In der Einstellung *pre-comp* wird das Fenster auf die Impulsantwort der gesamten Meßstrecke inklusive der Laufzeit des Meßsystem (1-2 ms) und des Meßobjektes angewandt. Vorher abgezogen werden lediglich ein einstellbarer *Group delay comp. Offset* bzw. die Laufzeit, die sich aus der Entfernung Lautsprecher-Mikrophon errechnet, soweit die Option *Delay shift* aktiviert ist. Abbildung 47 zeigt ein Beispiel. Der Impuls erscheint hier um ca. 1,3ms verzögert, was sich ausschließlich aus der Laufzeit des Meßsystems ergibt, die in der *Build impulse response = pre comp* Einstellung noch nicht kompensiert ist. Die aus der Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrophon entstehende Laufzeit ist dagegen bereits abgezogen, da die Option *Delay shift* aktiviert wurde. Abbildung 48 zeigt die unter identischen Einstellungen erstellte Messung mit einer zusätzlich aktivierter Fensterfunktion, welche die späteren Reflexionen ausblendet.

In der Einstellung *post-comp* wird das Fenster auf die bereits mit der Kompensationsdatei aus der Referenzmessung bearbeiteten Impulsantwort angewandt. Von der Fensterfunktion betroffen ist damit nur die schon von allen Laufzeiten des Meßsystems und dem möglichen Laufzeitoffset befreite Impulsantwort des Meßobjektes. Der höchste Peak der Impulsantwort ist dann in der Regel der erste Abtastwert. Abbildung 49 zeigt die Messung aus Abbildung 48 in der *post comp* Stellung. Sämtliche Laufzeiten sind jetzt abgezogen, so daß die Impulsantwort ausschließlich diejenige des eigentlichen Meßobjektes ist.

Die Fensterung der Impulsantwort wird im Normalfall nur bei Lautsprechermessungen in nicht reflexionsfreier Umgebung notwendig. Durch die räumliche Anordnung bei Lautsprechermessungen bedingt, kann es nun vorkommen, daß nicht alle Anteile der Impulsantwort hinter dem Maximum liegen, sondern teilweise auch schon vorher. Ein weit nach hinten versetzter Hochtontreiber an einem Horn, der nicht mit einem Delay an einen weiter vorne liegenden Mitteltieftöner angepaßt ist, kann genau solche Effekte verursachen. Problematisch wird es nun im Zusammenhang mit der *Detect Distance* Funktion und einem Fenster.

Bei Lautsprechermessungen wird über die automatische *Detect Distance* Funktion die Entfernung zwischen Lautsprecher und Meßmikrophon über den Abstand des Maximums in der Impulsantwort zum Nullpunkt bestimmt. Ausschlaggebend ist damit meist das akustische Zentrum des Hochtöners. Wird der hier ermittelte Entfernungswert für die Laufzeitkompensation verwendet, dann rückt der Peak in der Lautsprecherimpulsantwort in der *post comp* Einstellung an den Anfang des Zeitsignales, so daß sich bei der Berechnung des Phasenganges aus dieser Impulsantwort der korrekte minimalphasige Anteil für den Hochtöner ergibt. Soweit gestaltet sich der Vorgang völlig problemlos. Wird nun aber eine Fensterfunktion verwendet, so daß nur der vordere Teil der Impulsantwort ausgewertet und der Rest ausgeblendet wird, so fallen auch die möglicherweise schon vor dem Peak in der Impulsantwort gelegenen Anteile dem Fenster zum Opfer, da diese jetzt durch das zyklische Verschieben der Impulsantwort bei der Laufzeitkompensation ans Ende gerutscht sind.

Diesem Effekt kann damit begegnet werden, daß man den über *Detect Distance* bestimmten Entfernungswert nicht direkt verwendet, sonder einen geringfügig kleineren Wert einsetzt, wenn eine Fensterfunktion bei der Messung angewandt werden muß. Die tatsächliche Entfernung zwischen der Frontplatte des Lautsprechers und dem Meßmikrophon kann natürlich auch mit einem Metermaß nachgemessen und eingetragen werden, womit man auf jeden Fall auf der sicheren Seite liegt, so daß keine frühen Anteile der Impulsantwort durch ein Fenster weggeschnitten werden.

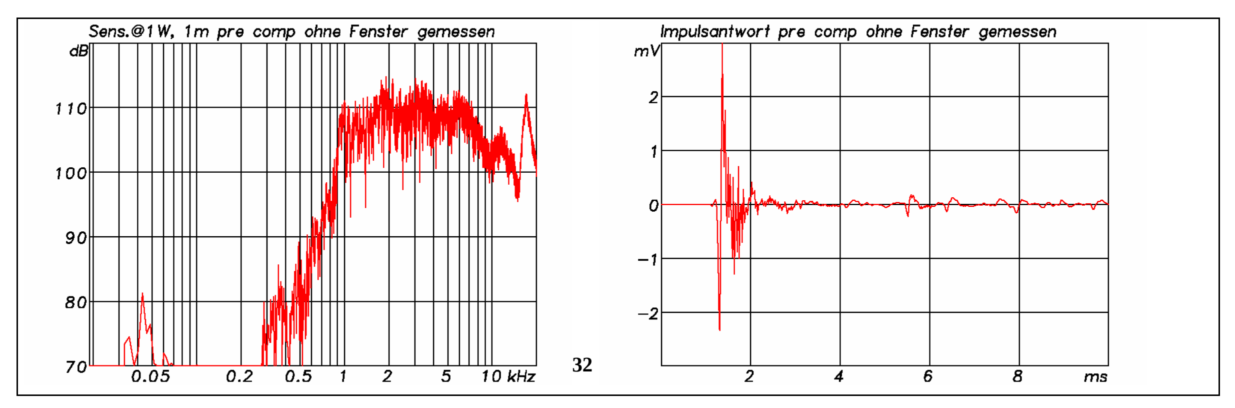


Abbildung 47 **Frequenzgang und Impulsantwort gemessen in pre comp Stellung mit Delay shift ; Die Kompensation wurde daher nur auf den Frequenzgang angewandt und nicht auf die Impulsantwort, so daß hier noch die Laufzeit des Meßsystems von 1,3ms zu erkennen ist.**

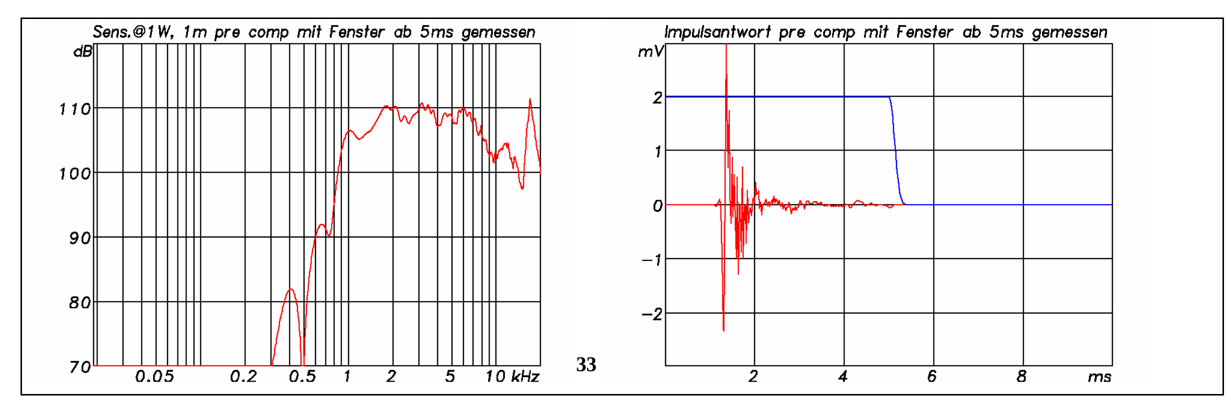


Abbildung 48 **Frequenzgang und Impulsantwort gemessen in pre comp Stellung mit Delay shift ; Zusätzlich wurde ein Fenster eingesetzt, das die Reflexionen in der Impulsantwort ausblendet**

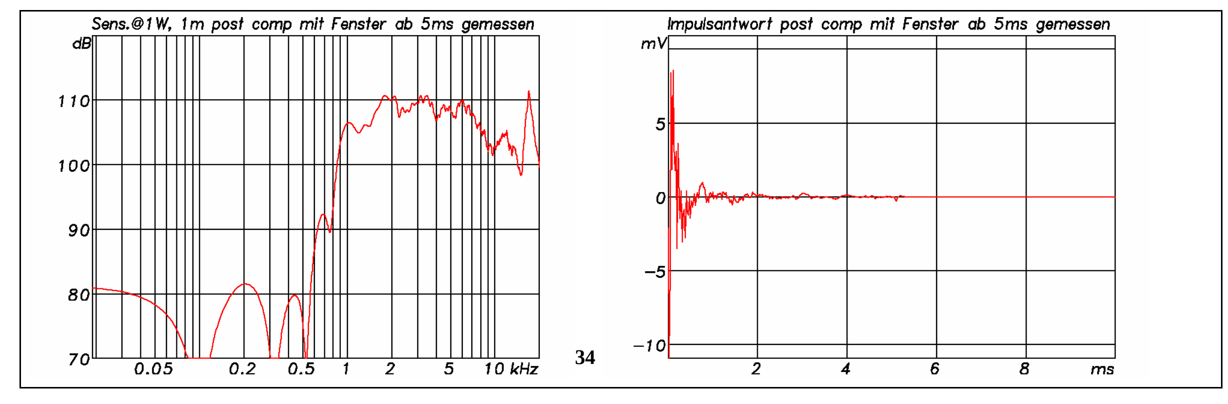


Abbildung 49 **Frequenzgang und Impulsantwort gemessen in post comp Stellung mit Delay shift ; Zusätzlich wurde ein Fenster eingesetzt, das die Reflexionen in der Impulsantwort ausblendet**
Die Impulsantwort ist jetzt ausschließlich die des Lautsprechers

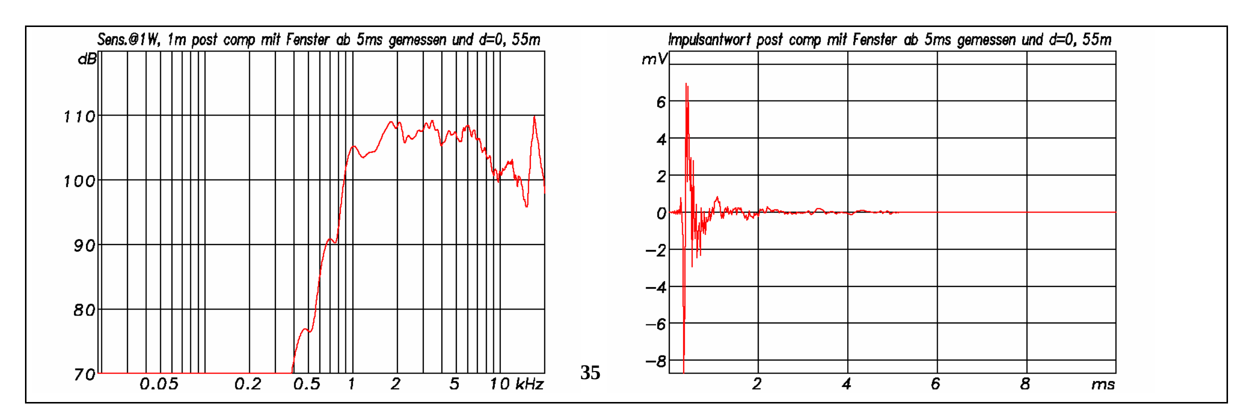


Abbildung 50 Frequenzgang und Impulsantwort gemessen in post comp Stellung mit Delay shift und Fenster mit tatsächlicher Entfernung zwischen Mikro und Lautsprecherfront (d=0,55m) gemessen

In der aktuellsten Programmversion findet sich die Option *Delay shift*, mit der die Kompensation der Laufzeit zwischen Lautsprecher und Mikrophon deaktiviert werden kann.

Ohne *Delay shift* Option sieht man jetzt die Impulsantwort mit der gesamten Laufzeit der Strecke zwischen Lautsprecher und Mikrophon und kann in einfacher Weise ein Fenster so plazieren, daß störende Reflexionen ausgeblendet werden. Mit aktivierter *Delay shift* Option besteht auch weiterhin die Möglichkeit direkt den minimalphasigen Anteil des Phasenverlaufes eines Lautsprechers angezeigt zu bekommen. Ein Fenster sollten dann nur mit Bedacht gewählt und gesetzt werden.

Insgesamt ein recht verwirrender Zusammenhang, der sich kurz damit zusammenfassen läßt, daß man meist damit richtig liegt, die Einstellung *Build impulse response = post comp* und *Delay shift = no* zu wählen. Die Impulsantwort zeigt dann die exakte Laufzeit zwischen Lautsprecher und Mikrophon. Die Laufzeit des Meßsystem ist aber schon subtrahiert und der Frequenzgang entsprechend kompensiert.

	Signalverarbeitung bei pre-comp	Signalverarbeitung bei post-comp
1.	**AD/DA** Ein Anregungssignal mit 2^n-1 Werten wird über die Meßstrecke geschickt und wieder aufgenommen	**AD/DA** Ein Anregungssignal mit 2^n-1 oder 2^n Werten wird über die Meßstrecke geschickt und wieder aufgenommen
2.	**FHT** berechnet die Impulsantwort der gesamten Meßstrecke Nur bei Anregungssignalen mit 2^n-1 Werten	**FHT** berechnet die Impulsantwort der gesamten Meßstrecke Nur bei Anregungssignalen mit 2^n-1 Werten
3.	**Laufzeit** (opt.) Bei Lautsprechermessungen wird die Laufzeit, die sich aus der Schallgeschwindigkeit und der Entfernung vom Lautsprecher zum Mikrophon ergibt bei aktivierter Delay shift Option abgezogen	**Laufzeit** (opt.) Bei Lautsprechermessungen wird die Laufzeit, die sich aus der Schallgeschwindigkeit und der Entfernung vom Lautsprecher zum Mikrophon ergibt bei aktivierter Delay shift Option abgezogen
4.	**Window** (opt.) Eine optionale Fensterung wird ausgeführt	
5.	**FFT** Der komplexe Frequenzgang wird aus der Impulsantwort berechnet	**FFT** Der komplexe Frequenzgang wird bei 2^n-1 Signalen aus der Impulsantwort und bei 2^n Signalen direkt aus den gesampelten Eingangsdaten des Meßsystems berechnet
6.	**Comp** Das komplexe Spektrum der gesamten Meßstrecke wird durch die Kompensationsdatei dividiert. Als Resultat verbleibt ausschließlich der komplexe Frequenzgang des eigentlichen Meßobjektes Damit ist auch die Laufzeit des Meßsystems kompensiert.	**Comp** Das komplexe Spektrum der gesamten Meßstrecke wird durch die Kompensationsdatei dividiert. Als Resultat verbleibt ausschließlich der komplexe Frequenzgang des eigentlichen Meßobjektes Damit ist auch die Laufzeit des Meßsystems kompensiert.
7.		**IFFT** Über eine inverse Fouriertransformation wird aus dem komplexen Frequenzgang des Meßobjektes dessen Impulsanwort berechnet
8.		**Window** (opt.) Eine optionale Fensterung wird ausgeführt und betrifft an dieser Stelle nur die Impulsantwort des Meßobjektes
9.		**FFT** Aus der jetzt gefensterten Impulsantwort wird via FFT erneut der komplexe Frequenzgang des Meßobjektes berechnet
10.	**Smooth** (opt.) Eine optionale Glättung kann auf Betrag oder Laufzeit oder beides mit verschiedenen Parametern angewandt werden.	**Smooth** (opt.) Eine optionale Glättung kann auf Betrag oder Laufzeit oder beides mit verschiedenen Parametern angewandt werden.
11.	**Darstellung der Resultate** Frequenzgang (`Ctrl M`) Phasengang (`Ctrl P`) Laufzeit (`Ctrl L`) Impulsantwort (`Ctrl U`)	

Tabelle 20 Arbeitsschritte in der pre- und post-comp Einstellung

8.6 Zerfallsspektren erstellen

Zerfallsspektren liefern weitergehende Informationen über das zeitliche Ausschwingverhalten des Lautsprechers, die nicht direkt aus dem Frequenz- oder Phasengang abgelesen werden können. Resonanzen, Partialschwingungen der Membranen oder Laufzeitsprünge lassen sich im Zerfallsspektrum meist deutlich einfacher aufspüren als in der Impulsantwort oder im Frequenzgang. Grundsätzlich sind die im Zerfallsspektrum zu erkennenden Verhaltensweisen des Lautsprechers natürlich in der Impulsantwort enthalten und werden ja letztendlich auch aus ihr gewonnen. Lediglich die Art der Darstellung liefert die zusätzlichen Informationen. Während zu Berechnung des Frequenzganges ein fester Ausschnitt oder auch die gesamte Impulsantwort des Lautsprechers via FFT in den Frequenzbereich transformiert wird, wird für das Zerfallsspektrum ein kürzeres Zeitfenster über die Impulsantwort geschoben und in bestimmten Zeitabschnitten transformiert. In einer dreidimensionalen Darstellung werden nun die einzelnen Frequenzspektren entsprechend ihrem Zeitversatz hintereinander abgebildet. Zur der üblichen Frequenzachse (x-Achse) und Pegelachse (y-Achse) kommt so eine dritte Achse, die Zeitachse (z-Achse), hinzu.

In dieser, einem Wasserfall ähnelnden Darstellung, kann jetzt beobachtet werden, wie schnell der Lautsprecher frequenzabhängig ausschwingt. Ideal wäre ein möglichst schnelles und gleichmäßiges Ausschwingen bei allen Frequenzen. Ein normaler Lautsprecher dagegen zeigt in der Regel ein eher zerklüftetes Wasserfalldiagramm mit mehr oder weniger vielen oder langen Nachschwingern. Resonanzstellen erscheinen hier als herausragenden Nachschwinger. Das Beispiel in Abbildung 52 zeigt das Zerfallsspektrum zum Frequenzgang des Lautsprechers in Abbildung 51. Sehr schön ist hier zu erkennen, wie einzelne Überhöhungen im Frequenzgang z.B. bei 600 und 800 Hz ihre Ursache in nachschwingenden Resonanzen haben. Für die tiefen Frequenzen ist der Anstieg der Laufzeit durch das Hochpaßverhalten des Lautsprechers gut zu erkennen, der nicht mit einer Resonanz verwechselt werden darf.

Ein Blick auf das Zerfallsspektrum eines Lautsprechers sollte daher nie versäumt werden. Leider steht dem aber zuerst noch ein Wechsel in das Programm Maxils im Wege. Maxils erwartet zur Berechnung eines Zerfallsspektrums eine Zeitsignal-Datei mit der Impulsantwort des Lautsprechers. Die Datei muß im ITA Format mit Header und 2-Byte langen Werten geschrieben sein und darf nicht mehr als 4096 Werte enthalten. Eine solche Datei kann von MF in recht einfacher Weise erzeugt werden, wenn die Frequenzgangmessung eines Lautsprechers vorliegt. Dafür ist das gesamte Frequenzspektrum in den Zeitbereich zu transformieren (↑E um alle Werte zwischen den Cursorn einzuschließen und anschließend I für die inverse FFT) und die ersten 4096

Werte sind in einer neuen Impulsantwort abzuspeichern. Mit der Funktion *Write Block* aus dem `Edit` Menu können beliebige Ausschnitte, die sich zwischen den Cursorn befinden als neue Datei abgespeichert werden. Für diesen Fall sollte der linke Cursor auf dem ersten Abtastwert stehen und der rechte Cursor auf dem Abtastwert 4096. Sprünge auf Cursorabstände von 2^n Werten können vereinfacht über die Tabulator Tasten erfolgen. Sind die Cursor richtig plaziert, dann kann der Ausschnitt zwischen den Cursorn mit *Write Block* aus dem `Edit` Menu im ITA 2-byte Format für Zeitsignale gespeichert werden. Für die weitere Verarbeitung ist es günstig, wenn sich das Maximum der Impulsantwort innerhalb der ersten 2-4 ms befindet. Die resultierende Datei sollte nach dem Speichern 8448 byte groß sein. Das mimosenhafte Verhalten von Maxils erzwingt genau diese Größe und dieses Format und nichts anderes. Der Peak in dieser Impulsantwort sollte im Anfangsbereich stehen, so wie es auch in Abbildung 51 zu erkennen ist. Steht der Peak nach der Berechnung der IFFT im hinteren Bereich der Impulsantwort und fällt damit erst gar nicht in die ersten 4096 Werte, so ist das Zeitsignal über *Cyclic Move* im `Edit` Menu entsprechend zu verschieben. Der aktive (gelbe) Cursor ist dabei kurz (2-4 ms) vor dem Maximum der Impulsantwort zu plazieren.

8.6.1 Maxils

Jetzt gilt es MF zu verlassen und Maxils aufzurufen, was sowohl unter DOS, wie auch unter Windows geschehen kann. Eine Unterscheidung zwischen Spektrumsdateien und Zeitsignalen geschieht in Maxils automatisch, so daß über das *Datei-Laden* Menu direkt das zuvor in MF erstellte Zeitsignal mit der Lautsprecherimpulsantwort geöffnet werden kann. Im *Darstellung-Impulsantwort* Menu kann jetzt schon mal ein Blick auf die Impulsantwort geworfen werden, die natürlich genauso aussehen sollte, wie der zuvor unter MF abgespeicherte erste Ausschnitt der Lautsprecherimpulsantwort. Als Zwischenschritt ist dann zunächst ein möglicher DC Anteil mit der Funktion *Auswerten-Offset* von der Impulsantwort zu subtrahieren. Unter *Darstellung-Zerfallsspektrum* erscheint jetzt schon mehr oder weniger das herbeigesehnte Zerfallsspektrum. Im Normalfall wird die Darstellung noch nicht den Wünschen entsprechen, so daß unter *Einstellungen-Optionen-Parameter(Zerf)* noch einige Einstellungen vorzunehmen sind. Hier kann die Fensterfunktion und die Skalierung der Zeit-, Frequenz- und Pegelachse vorgenommen werden.

Optionen Parameter Zerfallsspektrum in Maxils			
Menupunkt		**Funktion**	
Alpha Fensterfunktion		0..1 Ein- bzw. Ausblendebereich des Zeitfensters 0=0% (Rechteckfenster) 1=100% (sym. Hanning-Fenster) 0.1=10% (sym. Hanning-Fenster mit 90% Durchlaßbereich)	
Anzahl-Schritte		Anzahl der Spektren (1..40) d.h. Auflösung der Zeitachse	
Impulsantwort-Länge		Länge der geladenen Impulsantwort in Anzahl der Samples (Standardwert = 4096) 2^n-Werte aber nicht mehr als 4096	
FFT-Länge		Länge des Zeitfenster (Standardwert = 2048) 2^n-Werte aber nicht mehr als 2048	
Teiler-2		FFT-Länge = Länge der Impulsantwort/2	
Teiler-4		FFT-Länge = Länge der Impulsantwort/4	
Teiler-8		FFT-Länge = Länge der Impulsantwort/8	
Teiler-16		FFT-Länge = Länge der Impulsantwort/16	
Zoomfaktor		Zoomfaktor = 1 Zeitfenster durchläuft die gesamte Impulsantwort Zoomfaktor = 4 Zeitfenster durchläuft den Anfang der Impulsantwort mit Faktor 4 gezoomt Die Anzahl der Schritte bleibt konstant	
Delay		Offset am Anfang der Impulsantwort wird abgezogen und die Zeitachse bekommt den entsprechenden Offset	
Normierte Darstellung		Maximum aller Spektren entspricht 0 dB Alle Zerfallsspektren werden 2x berechnet für die Normierung	

Optionen Parameter Zerfallsspektrum in Maxils			
Untere Grenzfrequenz		Untere Grenzfrequenz bei der Darstellung	
Obere Grenzfrequenz		Obere Grenzfrequenz bei der Darstellung	
Pegelskala		Pegelskala des Zerfallsspektrum (Standard 30 dB entspricht einer Darstellung von –25..+5 dB)	

Tabelle 21 Das Menu Parameter Zerfallsspektren in Maxils

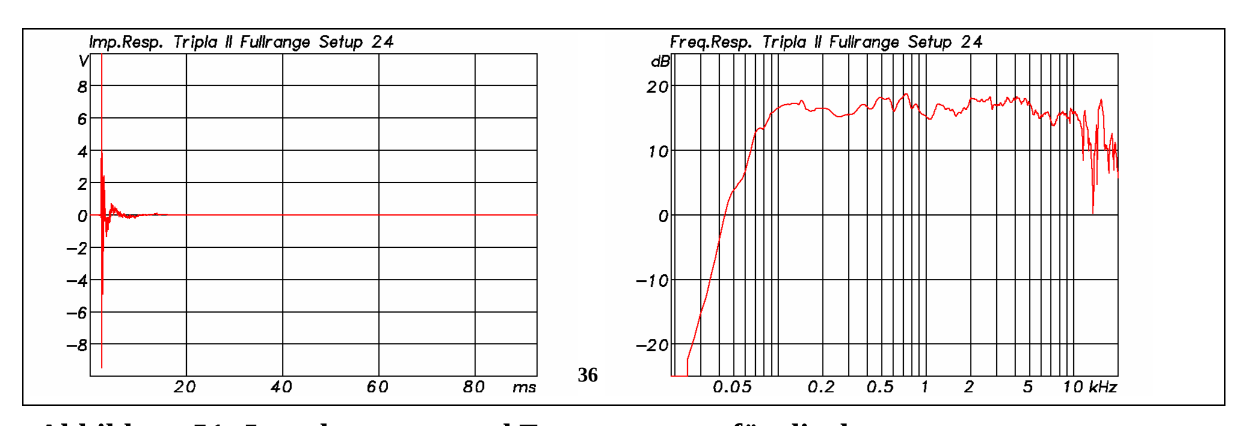


Abbildung 51 Impulsantwort und Frequenzgang, für die das Zerfallsspektrum berechnet werden soll

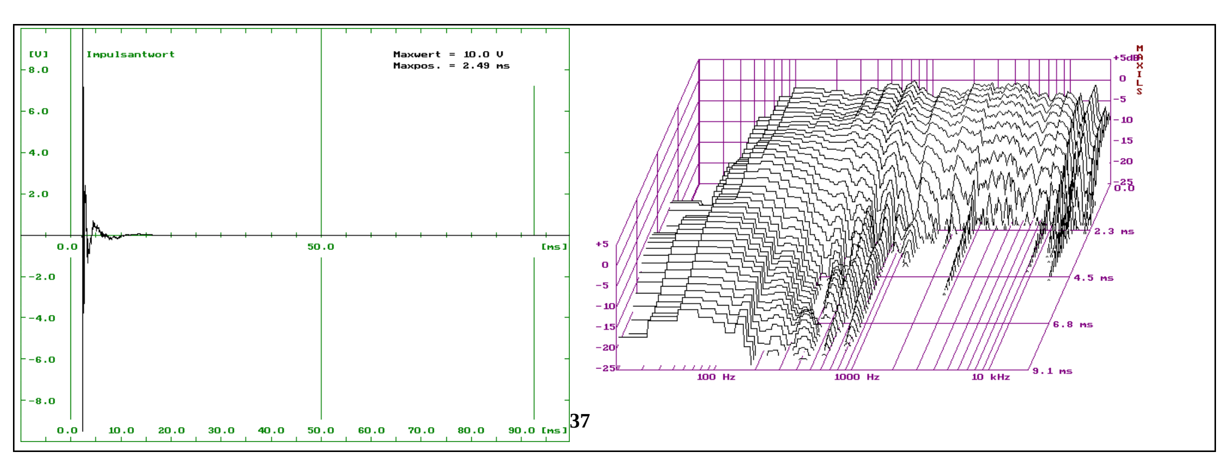


Abbildung 52 Impulsantwort und Zerfallsspektrum (Zoomfaktor 5) in Maxils

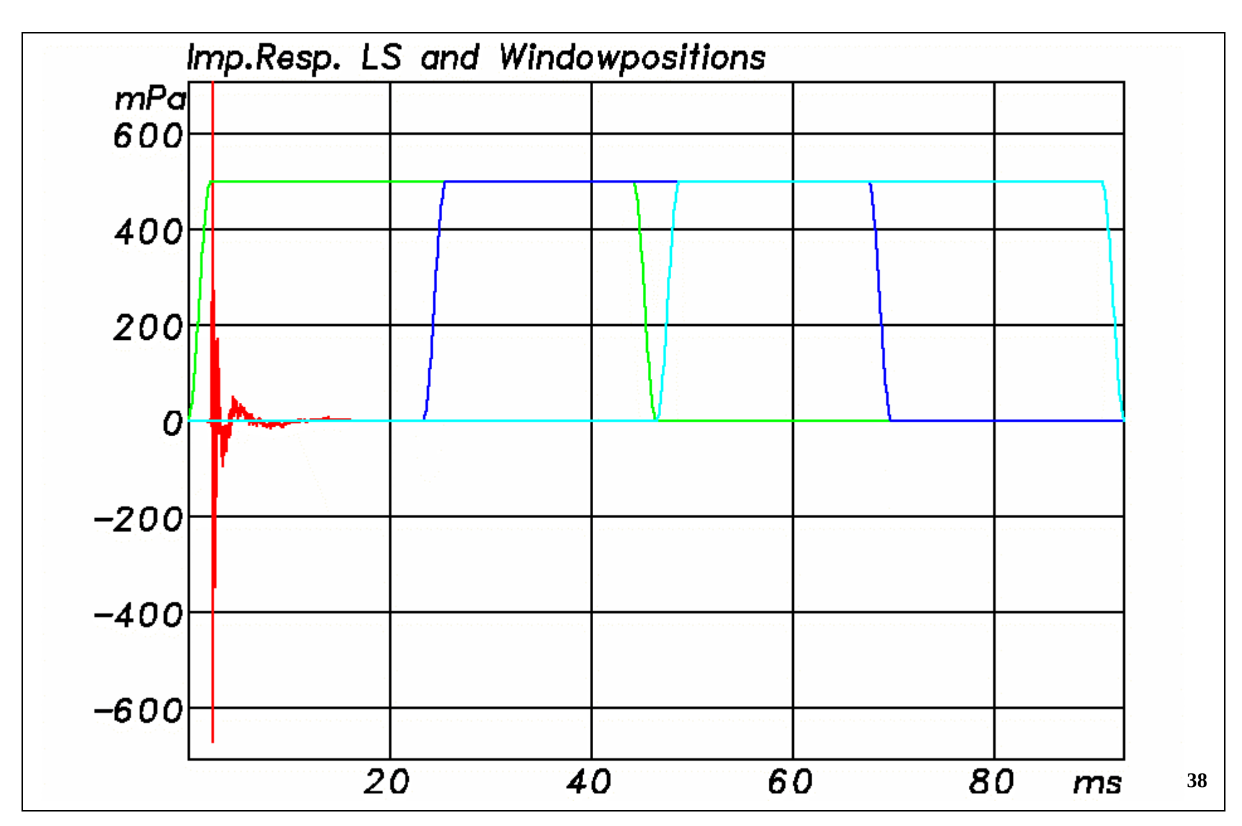


Abbildung 53 Verschobene Zeitfenster für die einzelnen Spektren (Startposition 0 ms ; Mitte 22 ms ; Endposition 46,4 ms)

Abbildung 51 zeigt in MF den Frequenzgang und die ersten 4096 Werte der Impulsantwort des Lautsprechers, dessen Zerfallsspektrum berechnet werden soll. Das Maximum der Impulsantwort liegt ca. 2,5 ms nach dem Beginn des Zeitsignales, womit nicht die Gefahr besteht, daß es durch die Fensterfunktion schon im ersten Spektrum beschnitten wird. Die Standardeinstellung von Maxils setzt die Fensterlänge auf 2048 Werte und den Fensterbereich auf 10% bzw. den Durchlaßbereich symmetrisch auf 90%. Für das erste Fenster beginnt der Durchlaßbereich somit nach 2,322 ms bzw. nach 103 Abtastwerten. Wie sich das Fenster von der Start- bis zur Endposition über die Impulsantwort bewegt, zeigt Abbildung 53 für die Standardeinstellung mit 10% Fensterbereich, 2048 Werte Fensterlänge und einem Zoomfaktor von 1. Für die Darstellung in Abbildung 52 wurde ein Zoomfaktor von 5 für die Zeitachse gewählt. Der Offset für das Zerfallsspektrum in Abbildung 52 beträgt 0, wie an der bei 0 ms beginnenden Zeitachse zu erkennen ist. Die untere und obere Grenzfrequenz der Frequenzachse liegen bei 20 Hz bzw. 20 kHz. Die Pegelskala umfaßt 30 dB.

Bei der Anwendung von Maxils ist zu beachten, daß der zugehörige Grafiktreiber VGA16.BGI oder EGAVGA.BGI sich in dem unter `Pfad-BGI` im `Datei` Menü eingestellten Verzeichnis befindet.

8.7 Polarmessungen an Lautsprechern

Polarmessungen erfassen das Abstrahlverhalten einer Schallquelle, z.B. eines Lautsprechers, in einer Ebene und stellen dieses in klassischer Form als kreisförmiges Diagramm dar, bei dem der Radius den Pegel in Abhängigkeit vom Winkel wiedergibt. Abbildung 54 zeigt ein Beispiel für diese Darstellungsform. Eine Unterscheidung nach der Frequenz kann nur über mehrere Kurven geschehen, so daß eine Auflösung in Oktavschritten 9 Polarplots und in Terzschritten 27 Polarplots verlangt. Eine Oktave und die drei zugehörigen Terzen können meist noch übersichtlich in einer Grafik abgebildet werden. Mit dreidimensionalen Abbildungen oder einer Pegeldarstellung über Farbabstufungen kann auch eine Frequenzachse eingeführt werden, die dann die komplette Darstellung in einem Diagramm erlaubt. Beispiele für die zweidimensionale Isobarenform und für eine 3D-Darstellung des Abstrahlverhaltens in einer Ebene finden sich in Abbildung 55 und Abbildung 56.

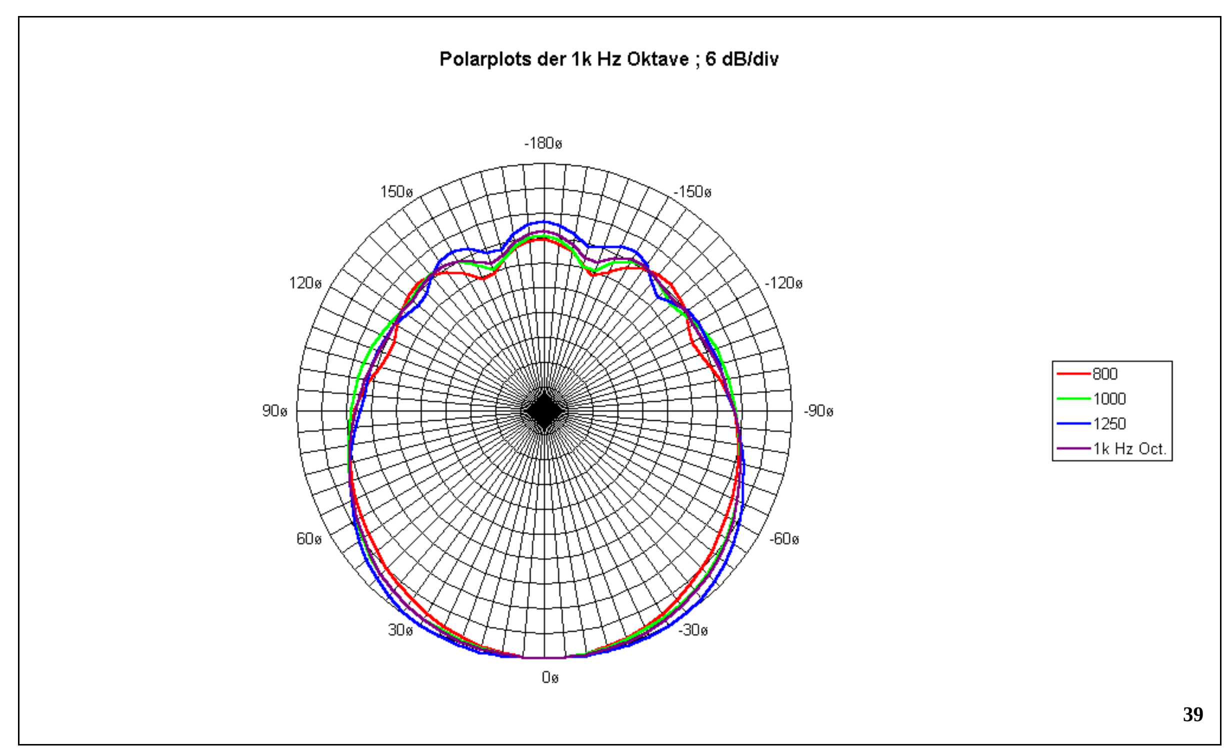


Abbildung 54 Klassisches Polardiagramm für die 1 kHz Oktave und die zugehörigen Terzen

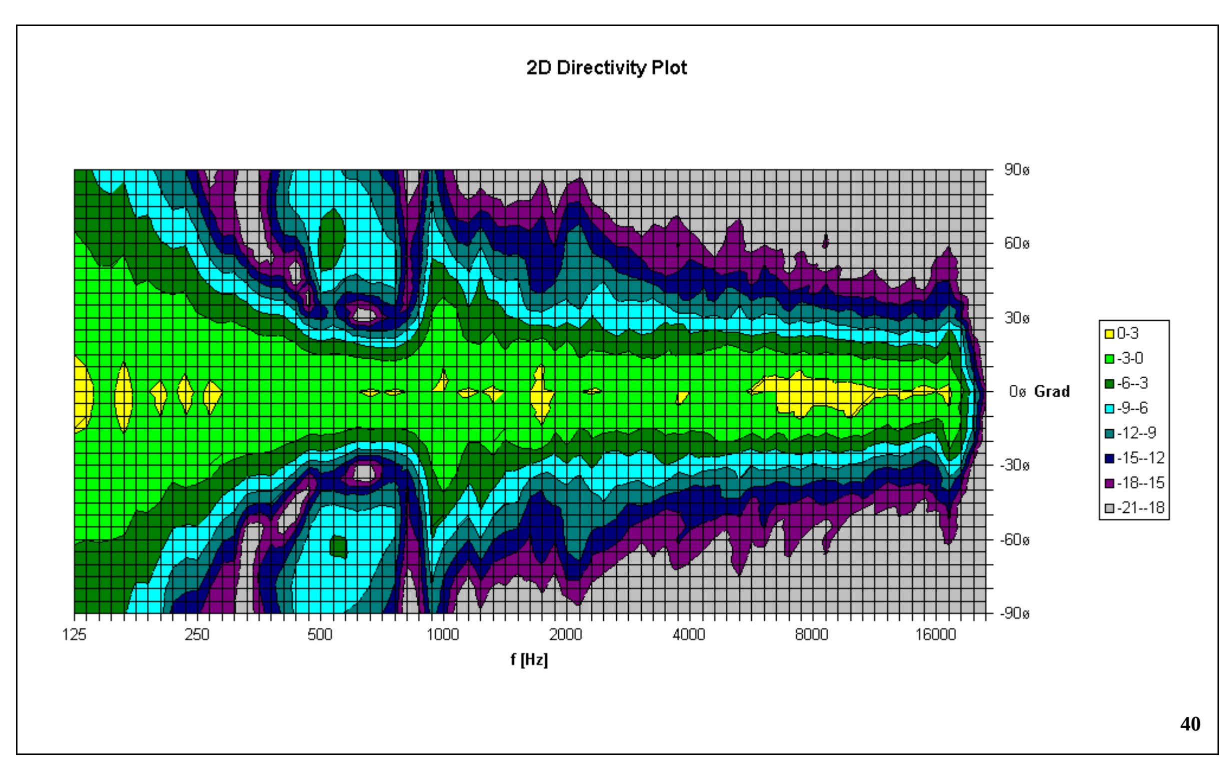


Abbildung 55 2D Isobaren Darstellung der Directivity für eine Ebene

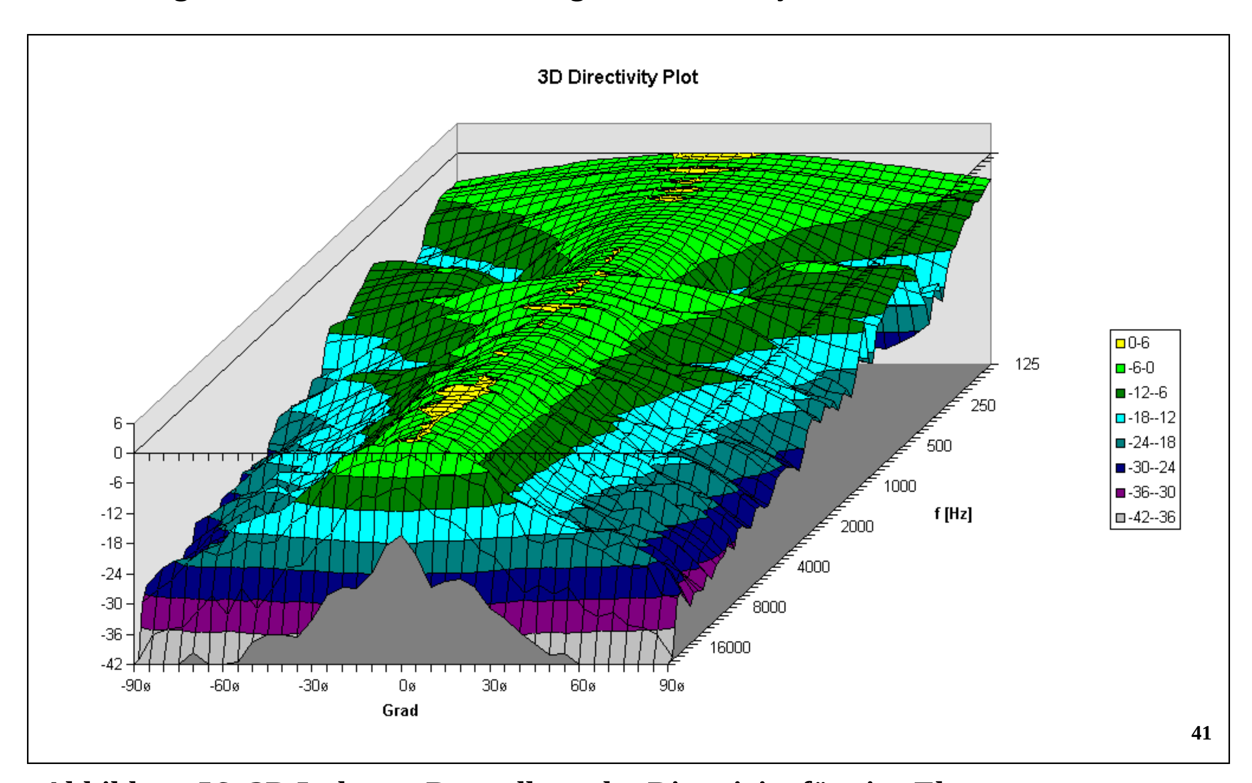


Abbildung 56 3D Isobaren Darstellung der Directivity für eine Ebene

Grundsätzlich muß bei Polarmessungen zwischen zwei Formen der Darstellung unterschieden werden. In der ersten Variante werden alle Werte auf die Messung der Mittelachse bei 0° bezogen. Der Frequenzgang bei 0° ist in diesem Fall immer völlig

gerade und beträgt 0 dB bei allen Frequenzen. Unter den verschiedenen Winkeln sind die Abweichungen zur Messung auf der Mittelachse aufgetragen.

In der zweiten Form werden die Werte absolut auf einen zu definierenden Bezugswert angegeben. Für jeden Winkel ist somit der tatsächliche Frequenzgang dargestellt. Die beiden Varianten sind einfach über die Art der Referenzmessung auszuwählen, wobei, in der auf die Mittelachse bezogenen Darstellung, die Referenzmessung mit der kompletten Meßstrecke inklusive Lautsprecher in der 0° Position erfolgt. Dieser Vorgang geschieht automatisch zu Beginn einer Meßreihe, wenn *Normalize to 0°* eingeschaltet ist. Eine zusätzliche Referenzmessung muß in diesem Fall nicht durchgeführt werden. Sollen dagegen absolute Schalldruckwerte in der Datei stehen, so muß vorher eine Referenzmessung ausgeführt werden. Der Vorgang entspricht dem bei einer normalen Lautsprechermessung unter *AD/DA LS sensitivity*.

Das Excel Makro verarbeitet in der hier beschriebenen Form nur die erste Form der relativen Darstellung. Für eine absolute Darstellung sind in der Makro Datei POLMAKRO.XLS oder direkt in der Darstellung die Skalierungen zu ändern. Problematisch gestaltet sich die relative Darstellung immer dann, wenn Frequenzgangeinbrüche auf der Mittelachse liegen, die durch Interferenzeffekte bedingt sind. Häufig ist dieses bei Polarmessungen in der vertikalen Ebene zu beobachten. Bezogen auf diesen lokalen Einbruch auf der Mittelachse stellt sich dann eine Aufweitung des Abstrahlverhaltens in dem betroffenen Frequenzbereich ein, der absolut betrachtet gar nicht vorliegt.

8.7.1 Varianten und Ablauf einer Polarmessung

Bei den Polarmessungen lassen sich vier verschiedenen Ausgangsdatei-Typen auswählen. Die erste Möglichkeit ist die Erzeugung von ganz normalen FFT-Spektren mit der üblichen Endung ".SPK". In diesem Fall wird also für jede Einzelmessung ein separates Spektrum auf der Platte abgelegt. Die Namen dieser Spektren werden automatisch erzeugt und beeinhalten den vertikalen und horizontalen Winkel der Messung (VxxxHxxx.SPK). Da für beide Winkel nur jeweils 3 Stellen zur Verfügung stehen, werden zu negativen Winkel 360° dazuaddiert. Beispiel: Die Messung mit vertikalem Winkel -30° und horizontalem Winkel von 150° trägt den Namen V330H150.SPK.

Die Kommentarzeile dieser Spektren wird ebenfalls automatisch erzeugt und setzt sich aus folgenden Einträgen zusammen: Hersteller und Name des Meßobjektes, so wie sie im *Polar data setup* Fenster eingetragen worden sind, gefolgt vom Schriftzug "Polar Resp." und den Winkelangaben "Ver xxx°" und "Hor yyy°". Sind Hersteller und Name in der Summe mehr als 39 Zeichen lang, so wird der Name entsprechend gekürzt, damit in der

71 Zeichen umfassenden Komentarzeile noch ausreichend Platz für die Winkelangaben verbleibt.

Die Spektrums-Namen und Kommentarzeilen werden auch dann erzeugt, wenn als Output-Format "Excel-Ascii" oder "UNF+GDF" gewählt wird. Die Spektrumsdateien werden in diesem Fall allerdings selbstverständlich nicht abgespeichert. Hat man sich für die Abspeicherung von Einzel-Spektren entschieden, so wird man in der Regel tatsächlich an den frequenzmäßig hochaufgelösten FFT-Spektren interessiert sein. In diesem Fall sollte der Schalter *Smooth* (hinter den ihn begleitenden Parameter verbirgt sich die Aufaddition der Spektrallinien zu Stufen konstanter relativer Bandbreite) auf *no* gesetzt werden.

Die zweite Ausgabemöglichkeit besteht im "POX"-Format, welches die Pegelwerte der Polarmessungen in einer für die Tabellenkalkulation Excel verständlichen Form enthält. Das Format ist derzeit nur für Messungen in einer Ebene definiert. Bei Auswahl der Sphären Viertel- Halb- oder Vollraum werden allerdings auch die Daten der anderen Vertikalebenen untereinander in diese Datei geschrieben. Die Datei ist dann nicht mehr zu diesem Makro kompatibel, läßt sich gegebenfalls aber leicht mit einem Ascii-Editor aufteilen, wobei die horizontalen Winkelangaben in der ersten Spalte hilfreich sind.

Die dritte Ausgabemöglichkeit ist die gleichzeitige Erzeugung des "Ulysses Native Format" (UNF) und der "Generic Device Files" (GDF), wie sie als schweres Erbe immer noch von EASE genutzt werden. Zur Erzeugung einer gültigen Datei muß die Meßreihe mindestens über eine Viertel Sphäre erfolgen, wenngleich sie von Monkey Forest auch bei der Messung nur in der Horizontalebene angelegt werden.

Beide Ascii-Dateien werden erst NACH Beendigung der Meßreihe erzeugt. Vor der Meßreihe wird zunächst eine mit Null vorbesetzte Binärdatei für alle Meßpositionen und -Frequenzen angelegt. Sie enthält headerfrei die Pegeldaten in dB im Single Precision (32 Bit) Fließkommaformat nach IEE 754 (als Array [Ver][Hor][Freq]). Sie läßt sich somit also auch auf einfachste Weise von selbstgeschrieben Programmen einlesen. Während der Meßreihe wird die Binärdatei nach jeder Einzelmessung geöffnet, die Werte für die entsprechende Position eingetragen und wieder geschlossen. Sollte es also während der Messreihe zu einem gewollten oder unbeabsichtigtem Abbruch kommen (z.B. durch Auslösen der Netzsicherung, wenn sich das tonnenschwere Ungetüm "Knarrzi", der Drehteller des Institutes für technische Akustik zu Aachen, in Bewegung setzt), so sind die bis dahin erzeugten Daten nicht verloren: Die Meßreihe kann einfach erneut gestartet werden, wonach der vertikale Winkel durch Drücken der '+' Taste auf die letzte nicht vollständig erfasste Vertikalebene gesetzt werden kann. Die Binärdatei wird in diesem Fall (wenn also Name und Größe gleich bleiben) NICHT erneut initialisiert, sondern behält

ihre schon eingetragenen Werte. Die neuen Messungen ergänzen dann die schon vorhandenen Werte. Ebenfalls praktisch nutzen läßt sich diese Eigenschaft, wenn sich nach der kompletten Meßreihe bei der grafischen Aufbereitung ein Ausreißer herausstellt. Die Messung kann dann für den fraglichen Vertikalwinkel einfach noch mal wiederholt werden. Nach Erreichen des fehlerhaften Horizontal-Winkels darf die Messung auch innerhalb des horizontalen Ablaufs (mit ESC) abgebrochen werden.

Die schon erwähnte Binärdatei trägt als Prefix den gleichen Namen wie die UNF- und GNF-Datei, die Endung lautet ".TMP". Trotz dieser Kennung als Temporärdatei wird sie von Monkey Forest aber nicht selbsttätig gelöscht, damit sie eben zur Ergänzung durch spätere partielle Meßreihen zur Verfügung bleibt. Beim Eintragen des "Device Name" werden die ersten acht Buchstaben automatisch zur Bildung des Prefixes der Ausgangsdateien (POX, TMP, UNF und GDF) herangezogen. Bei Gefallen bracht dieser Name also nicht noch einmal extra eingegeben werden, bei Mißfallen steht einer Änderung nichts im Wege.

Vielfach ist für die Polarmessungen eine Fensterung erforderlich. Beim Betreten des "Polar Response" Menus werden die betreffenden Fensterparameter automatisch aus dem "LS sensitivity" Untermenu kopiert. So können mit einzelnen Lautsprechermessungen zunächst experimentell die besten Einstellungen herausgefunden werden.

8.7.2 Drehteller

Die Messung des Abstrahlverhaltens (Directivity) eines Lautsprechers unter verschiedenen Winkeln erfordert zunächst einmal eine Drehvorrichtung für den Lautsprecher oder das Mikrophon. In der Regel befindet sich das Mikro in einer festen Position und der Lautsprecher wird von der Drehvorrichtung bewegt. Neben einfachen von Hand getriebenen Konstruktionen bietet sich hier der Drehteller des italienischen Herstellers Outline an, der bereits von MF in der automatischen Ansteuerung unterstützt wird und ein optimales Preis-/Leistungsverhältnis bietet. Die Steuereinheit (ET1) wird zu diesem Zweck über ein spezielles Kabel mit der parallelen Schnittstelle (LPT1:) des PCs verbunden und auf die gewünschte Schrittweite (z.B. 5 oder 10° Grad) geschaltet. Das Kabel ist wie folgt zu verdrahten:

LPT1: D-Sub-Stecker (male) 25 pin zum PC
ET1: D-Sub-Stecker (male) 9 pin zur Steuereinheit

D-Sub25: Pin 6 nach D-Sub9: Pin 2
D-Sub25: Pin 18 nach D-Sub9: Pin 4+5

Vor einer Meßreihe ist der Teller über die Steuereinheit in die 0 Grad Position zu fahren, da das Programm keine Rückmeldung über die Position des Drehtellers erhält und zunächst in eine definierte Ausgangsposition gebracht werden muß. Im `AD/DA` Menu unter `Polar Response` findet sich bei `Turn table select` das Menu zur Einstellung des Tellers. Alternativ kann auch *Moved by You* gewählt werden, wenn Lautsprecher oder Mikrophon zwischen den Meßreihen von Hand positioniert werden sollen.

8.7.3 Das Meßmenu Polar Response

Die Einstellungen im Polar Response Menu unter AD/DA finden sich in folgender Tabelle. Viele Einstellungen entsprechen dem LS-Sensitivity Menu. Auch der Messvorgang ist weitgehend identisch zum Menupunkt `AD/DA LS sensitivity`. Unter `AD/DA LS sensitivity` eingestellte Fensterfunktionen übertragen sich automatisch auf das `Polar Response` Menu, so daß ein mögliches Fenster zunächst im `LS sensitivity` Menu eingestellt und dann für Polarmessung verwendet werden kann.

AD/DA Polar Response			
Measurement Conditions			
Mic preamp gain	0 dB		Bei externem Mikrophon-Vorverstärker ist hier dessen Gain einzutragen
Correct by	0 dB		z.B. –6 dB bei Halbraummessungen
LS impedance	8 Ohm		Nominelle Impedanz des Lautsprechers
Mic-LS distance	2 m		Entfernung LS-Mic
Setups			
Turn table select			Drehtellereinstellungen
Polar data setup			Auswahl der Meßmethode und des Datenformates

AD/DA Polar Response			
Reference and more ...			Referenzmessung (nur bei Normalize to 0° nicht erforderlich)
Excitation			
Averaging	4		Bei starken Störgeräuschen evtl. erhöhen
Level	-12 dBu		Ausgangspegel am Line Ausgang Achtung: Endstufe +20 dB
Impulse response processing			
Build imp. resp.	Pre comp		Pre = Impulsantwort des gesamten Meßstrecke zur Fensterung verwenden Post = Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen und weiter verarbeiten (siehe auch 8.7.4), d.h. nur die Impulsantwort des Meßobjektes für die Fensterung verwenden
Delay shift ≤	no		Laufzeit durch die Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikro automatisch kom-pensieren (siehe auch 8.5)
Window	No		Fensterfunktion für die Impulsantwort Achtung: mit der Normalize to 0° Funktion nur bei pre-comp Einstellung verwenden
Spectral processing			

AD/DA Polar Response			
Equalizing File	Polco14.spk	⌨	Datei mit der Referenzmessung für Polar-Messungen Bei Normierung auf 0° steht die 0° Messung in dieser Datei
Smooth	Yes	⌨	Glättung stellt sich entsprechend der Auflösung z.B 1/10 octave automatisch ein
Display			
Dynamic Range	50 dB	⌨	Skalierung der Pegel
On top	110 dB	⌨	Abhängig vom erwarteten Meßbereich einstellen
Go for it ! ←			Start der Messung
Basic settings #			Zum AD/DA Basic settings menu
Quit			Polar Menu schließen

Tabelle 22 Einstellungen im Menu `AD/DA Polar Response`

Polar Response Settings			
Vertical Coverage			
Sphere		⌨	Horiz.only nur eine Ebene messen für Polardiagramme und 2D bzw. 3D Isobarendarstellung ¼ space ¼ Kugelrasternetz vermessen ½ space ½ Kugelrasternetz vermessen full space ganzes Kugelraster-

			netz vermessen
Angle range			Vert. Winkelbereich (stellt sich automatisch ein)
Angle step			Vert. Winkelschrittweite = Horz. Winkelschrittweite
Horizontal Coverage			
Angle range ±	90°		Winkelbereich: ±90° für Isobaren ±180° für Polardiagramme sonst 0...180° für Rasternetze
Angle step	5°		Winkelauflösung Standard 5° oder 10°
Normalize to 0°	Yes		Alle Messungen auf die Mittelachse (0°) normieren Nicht zusammen mit der Post-comp Einstellung und einer Fensterfunktion anzuwenden !!! Bei **No** muß eine Referenzmessung gemacht werden
Skip 0°	No		Bei Normierung auf die Mittelachse diese Meßreihe automatisch auf 0 dB setzen
Frequency range			
Lower cut off	15,6 Hz		Untere Grenzfrequenz bei ASCII Datei: 15,6 Hz
Upper cut off	21,2 kHz		Obere Grenzfrequenz bei ASCII Datei: 21,2 kHz
Frequency steps	1/10 – octave		Frequenzauflösung: 1/10 oct. Für Isobaren

			1/3 oct. Für Polardiagramme
Output File			
Output	Spk/Excel-Ascii		Jeden Winkel als Spektrums-Datei im ITA Format abspeichern oder alle Werte in einer ASCII Datei für die Weiterverarbeitung unter Excel zusammenfassen
Ascii file name	XXX-HOR.POX		Dateiname für ASCII File Die Endung paßt sich automatisch an
Device name			Lautsprechertyp für Kommentar in der ASCII Datei
Manufacturer			Herstellername für Kommentar in der ASCII Datei
Quit			Zurück zum Polar Response Menu

Tabelle 23 Einstellungen im Unter-Menu `Polar Response Settings`

Für eine Polarmessung ist ein hinreichend großer Abstand zwischen Lautsprecher und Meßmikrophon zu wählen, damit sich die einzelnen Chassis nicht in der Messungen voneinander separieren können. Als Faustformel gilt auch hier, daß die Meßentfernung mindesten das 5-fache des größten Abstandes der Mittelpunkte zweier Treiber auf der Frontplatte betragen sollte. In der 0° Position ist die Box so auszurichten, daß die Mittelachse der Box auf das Meßmikrophon zeigt. In der Regel ist diese Richtung auch die Hauptabstrahlrichtung. Hat der Lautsprecher ein zur Mittelachse unsymmetrisches Abstrahlverhalten, d.h. die geometrische Mittelachse stimmt nicht mit der Hauptabstrahlrichtung überein, wie es z.B. bei einigen Downfills mit Bedacht eingerichtet wurde, so ist der Meßaufbau trotzdem an der geometrischen Mittelachse auszurichten.

8.7.4 Fenster bei Polarmessungen

Für Meßaufbauten in nicht reflexionsfreier Umgebung müssen bei einer Polarmessungen Fensterfunktionen eingesetzt werden. Kleine Lautsprecher können z.B. mit einem Stativ in 2m Höhe auf dem Drehteller plaziert werden. Das ebenfalls auf einem Stativ in 2m Höhe befindliche Mikrophon wird dann in einem Abstand von 1-2 m aufgestellt. Der Direktschall würde für eine Meßentfernung von 1 m nach ca. 2,9 ms eintreffen, die Bodenreflexion hat dagegen einen Weg von 4,47 m zurückzulegen und trifft erst nach 13 ms ein. In der Impulsantwort wäre daher für diesen Aufbau ein rechtsseitig unsymmetrisches Fenster zu setzten, das spätestens 10 ms nach dem Direktschall alles weitere ausblendet.

An dieser Stelle tritt nun das Problem auf, daß eine Fensterung in der post-comp Einstellung, wo sich das Fenster ausschließlich auf die Impulsantwort des Meßresultates bezieht, auch schon bei kleineren Verschiebung des Peaks nach hinten, diesen sofort ausblenden würde. Das Meßresultat beinhaltet hier für Betrag und Laufzeit nur die Abweichungen von der Mittelachse. **Für die Anwendung einer Fensterfunktion bei Polarmessungen ist daher die Einstellung *Build imp. resp.* immer auf *pre-comp* zu schalten.** Das Fenster wird dann auf die Impulsantwort der gesamten Meßstrecke angewandt, noch bevor die Kompensation mit der Referenzmessung ausgeführt wurde. Für den vorab aufgeführten Beispielaufbau ist daher ein rechtsseitig unsymmetrisches Fenster so zu setzen, daß nach 13 ms eine völlige Ausblendung durch das Fenster erfolgt. Wie das Fenster am günstigsten zu plazieren ist, kann vorab durch eine Messung im Menupunkt *AD/DA LS sensitivity* getestet werden. Ein dort gesetztes Fenster überträgt sich automatisch für die Polarmessung und kann dann auch hier angewandt werden. Die Einstellung für *Build imp. resp.* sollte in beiden Fällen *pre comp* sein.

8.7.5 Verarbeitung mit Excel 5.0

Zur weiteren Auswertung sind zwei Formate der Polarmessung zu unterscheiden. Die erste Variante erfaßt einen Winkelbereich von -90° bis +90° bei einer Auflösung von 5 Grad. In der Tabelle gibt es somit 37 Zeilen, die den einzelnen Winkeln zugeordnet sind.

Der Frequenzbereich erstreckt sich von 15,6 Hz bis 21112,1 Hz in 1/10 Oktav Schritten. Die Tabelle umfaßt daher 105 Frequenzen, denen jeweils eine eigene Spalte zugeordnet ist. Ein Excel 5.0 Makro (`PP Directivity`) erstellt aus dieser Tabelle 2D und 3D Directivity Plots, wie in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Anfangs- und Endwerte des Winkel- und Frequenzbereiches sowie die Anzahl der Werte sind unbedingt einzuhalten. In der Tabelle stehen dB-Werte als Wirkungsgrad bezogen auf 1W und 1m oder relative Werte bezogen auf den Wert bei 0 Grad. Tabelle 24 zeigt einen

Ausschnitt aus einer ASCII Tabelle für Polarmessungen, wie sie von MF erstellt wird. Jeder Tabelle ist ein siebenzeiliger Header vorangestellt, der Informationen über das Datenformat enthält.

Das zweite Format umfaßt in 73 bzw. 37 Schritten bei 5 oder 10 Grad Auflösung den Winkelbereich von -180° bis +180°. Die Frequenzauflösung ist hier eine Terz. Insgesamt gibt es von 15,6 Hz bis 20158,7 Hz 32 Frequenzen in der Tabelle. Die zugehörigen Makros sind `Polarplots5° und Polarplots10°`. Die ASCII Dateien können in Excel als benutzerdefiniert geladen werden. Der gültige Datenbereich beginnt in Zeile 8 mit der Frequenzzeile. Die in Excel erstellten Grafiken können dann in einfacher Weise als PCX Grafiken weiterverarbeitet werden.

f[Hz]->	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6	22,1	23,7	25	……
-90ø	-22,2	-22,4	-27,9	-30,6	-26,7	-25,4	-28,8	-29,7	
-85ø	-21,1	-17,8	-16,9	-17,9	-22,9	-25,6	-24,3	-25,2	
-80ø	-25	-21,7	-21,9	-22	-22	-23,9	-29,2	-25,5	
-75ø	-22,3	-20,6	-21,1	-21	-19,6	-20,8	-26,4	-24,9	
-70ø	-20	-20,7	-27,5	-31,1	-27,2	-26,7	-32,2	-29,6	
-65ø	-19,7	-19,2	-23	-26,6	-29,5	-30,8	-29,5	-26,1	
-60ø	-25	-23,8	-24,6	-23,9	-19,6	-20,6	-30,7	-29,6	
-55ø	-17,7	-16,1	-15,5	-13,9	-9,9	-9,1	-13,5	-22,2	
-50ø	-17,5	-18,7	-24,3	-26,5	-20,8	-17,8	-19,4	-21,5	
-45ø	-20,8	-25,1	-37,2	-41,6	-28,4	-20,6	-22,1	-25,4	
-40ø	-22,8	-22	-28,3	-32,2	-30,3	-30,7	-34,9	-33,9	
-35ø	-25,9	-28	-36,6	-40,6	-34,1	-29,3	-27,5	-26	
-30ø	-18,1	-19,2	-25	-28,6	-27,2	-26,2	-25,7	-29,6	
….									

Tabelle 24 Ausschnitt einer ASCII Tabelle aus einer Polarmessung Winkel in Zeilen, Frequenzbänder in Spalten

8.8 UNF und GDF Daten messen und auswerten

Befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung. Die Funktionen sind in MF aber schon vollständig funktionsfähig. (siehe auch Kap. 8.7)

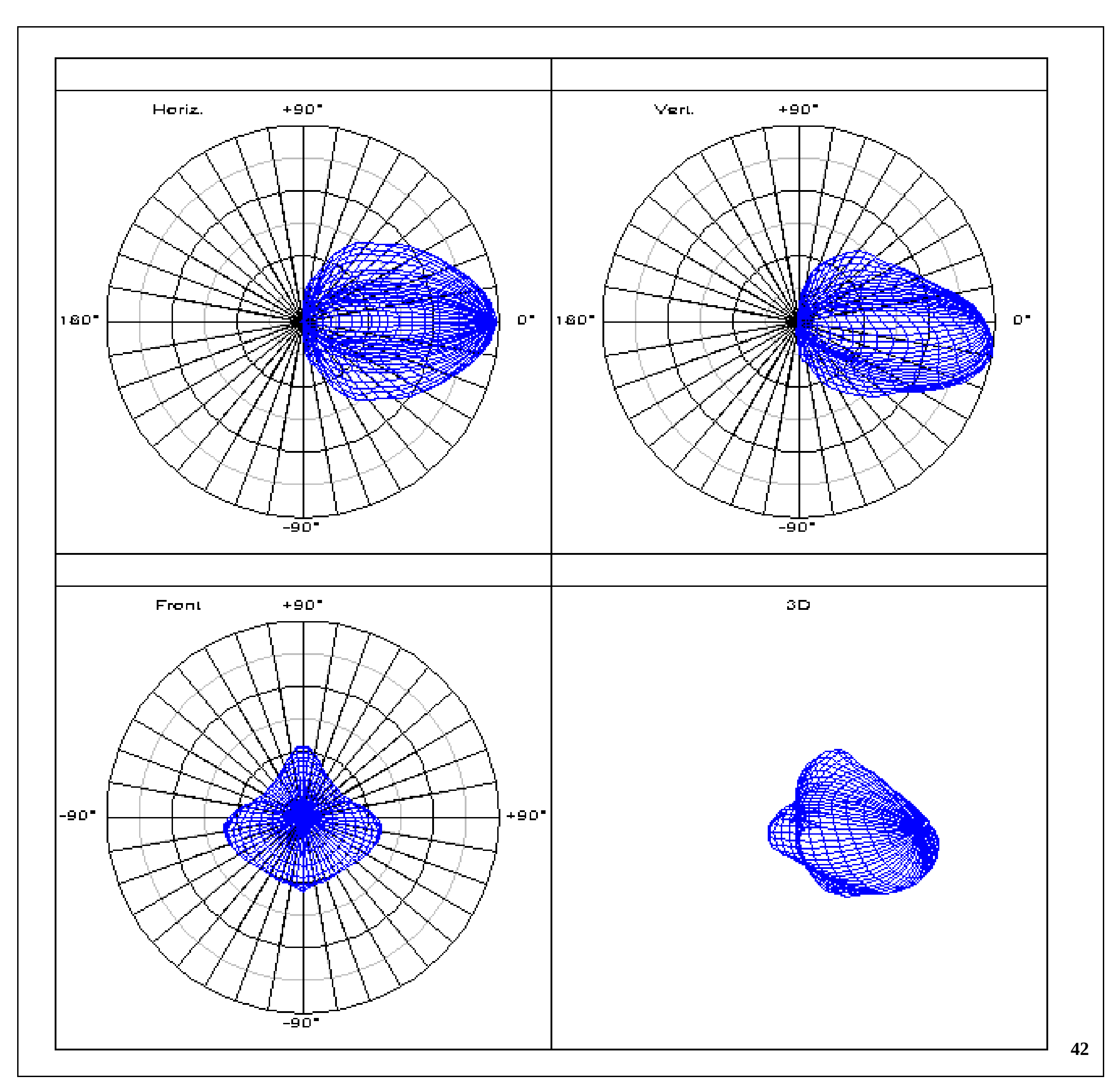


Abbildung 57 3D Darstellung einer UNF Datei mit 5 Grad Auflösung aus Ulysses (Ulysses © by IFB) 4 kHz Oktave und 5 dB/div

8.9 Maximalpegel und Klirrfaktormessungen an Lautsprechern

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Lautsprechers gehört neben dem Frequenzgang und der Directivity der erreichbare Maximalpegel (Max SPL) zu den wichtigsten Eigenschaften. Letztendlich entscheidet dieser Wert darüber, wie weit ein Lautsprecher seinen Anforderungen, einen bestimmten räumlichen Bereich zu beschallen, nachkommen kann. Simulationsprogramme, welche die Berechnung von Beschallungsanlagen erlauben, benötigen hier eine zuverlässige Angabe z.B. zur Berechnung der Sprachverständlichkeit in einer mit Lärm erfüllten Umgebung.

Die gelegentlich anzutreffende Methode, aus der Sensitivity und der Belastbarkeit den maximalen Schalldruck zu errechnen, führt in der Regel zu übertriebenen Werten. Viele Effekte, wie z.B. die elektrische Powercompression, die Portcompression, Partialschwingungen der Membranen und natürlich die limitierte Auslenkbarkeit der Membranen werden so nicht berücksichtigt. Insbesondere bei hohen und tiefen Frequenzen werden daher diese theoretischen Werte bei weitem nicht erzielt.

Eine deutliche höhere Aussagekraft haben komplette Meßreihen, die in bestimmten Abständen über der Frequenzachse den Klirrfaktor und Schalldruck ermitteln. Zur Klirrfaktormessung stehen in MF im *AD/DA* Menu drei verschiedene Verfahren zur Verfügung. In allen Fällen werden reine Sinussignale zur Messung verwendet. Nach der Übertragung über das Meßobjekt wird das Signal über eine FFT in den Frequenzbereich transformiert und analysiert. Unvermeidlich gehen dabei auch die Klirranteile der AD- und DA-Umsetzer des Meßsystems in der Größenordnung von –80 dB ein. Eine Leermessung mit gebrücktem Ein- und Ausgang des Meßsystems kann hier schnell Klarheit verschaffen, wo die Grenzen des Verfahrens liegen. Für Lautsprechermessungen sind diese Werte selbstverständlich bei weitem ausreichend, wo der Klirrfaktor von Lautsprechern schon bei geringer Belastung in Größenordnungen von –60 bis –40 dB liegt. **Vorsicht:** Die interne Endstufe sollte wegen ihrer geringen Ausgangsleistung von nur 20 Watt nicht für Klirrfaktormessungen an Lautsprechern verwendet werden. Von einer externen Endstufe sollten die maximale Ausgangsleistung und der Verstärkungswert bekannt sein, die bei Bedarf in MF in den Meßmenüs einzutragen sind.

THD+N single f Das anregende Sinussignal hat eine feste Frequenz und einen festen Pegel. Analysiert werden nur die harmonischen Klirranteile (THD) oder der gesamte Störpegel (THD+N), so daß auch nichtharmonische Verzerrungen, Rauschen und Brummen mit erfaßt werden. Die Darstellung erfolgt bezogen auf die Grundwelle + THD bzw. Grundwelle + THD+N oder bezogen auf einen

einstellbaren Referenzpegel. Die Grafik (siehe Abbildung 58) zeigt die Grundwelle, das Klirrspektrum und den Noisefloor als FFT Spektrum mit der unter *Degree* eingestellten Auflösung.

THD+N (f) Das anregende Sinussignal hat einen festen Pegel und ist variabel in der Frequenz. Analysiert werden nur die harmonischen Klirranteile (THD) oder der gesamte Störpegel (THD+N), so daß auch nichtharmonische Verzerrungen, Rauschen und Brummen mit erfaßt werden. Die Darstellung erfolgt immer bezogen auf den Pegel der Grundwelle + THD oder THD+N. In der Grafik (siehe Abbildung 59) werden über der Frequenzachse der THD bzw. THD+N Wert und nach Wunsch auch die Anteile der einzelnen harmonischen Verzerrungen aufgetragen.

LS max. SPL Das anregende Sinussignal hat einen variablen Pegel und eine variable Frequenz. Analysiert werden nur die harmonischen Klirranteile (THD) oder der gesamte Störpegel (THD+N), so daß auch nichtharmonische Verzerrungen, Rauschen und Brummen mit erfaßt werden können. Die Auswertung erfolgt immer bezogen auf den Pegel der Grundwelle + THD oder THD+N. In der Grafik (siehe Abbildung 62) werden über der Frequenzachse der maximale Pegel für einen oder zwei vorgegebene Verzerrungswerte aufgetragen. Neben der max. SPL Messung bei Lautsprechern eignet sich dieser Menupunkt auch zur Messung der Leistungsbandbreite von Endstufen oder Übertragern.

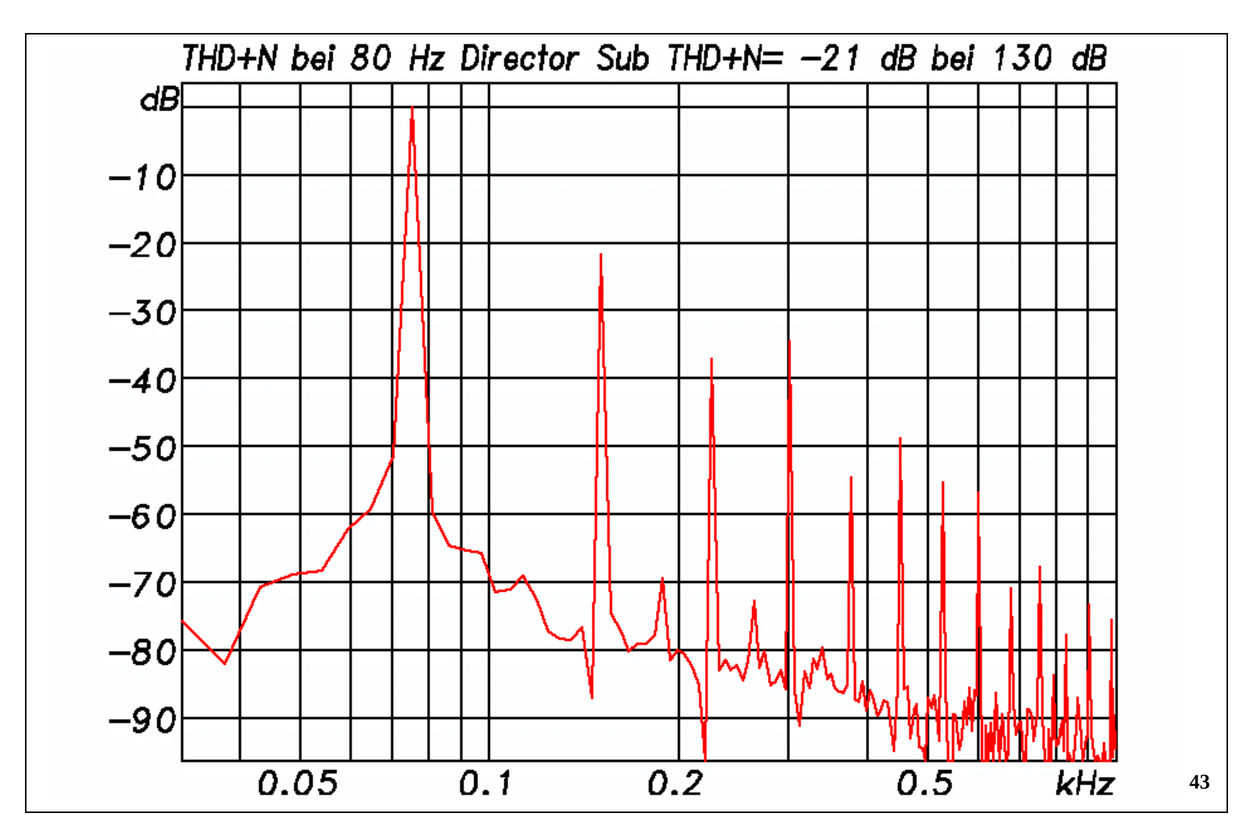


Abbildung 58 Klirrspektrum eines 18“ Lautsprechers bei 80 Hz @ 130 dB/1m

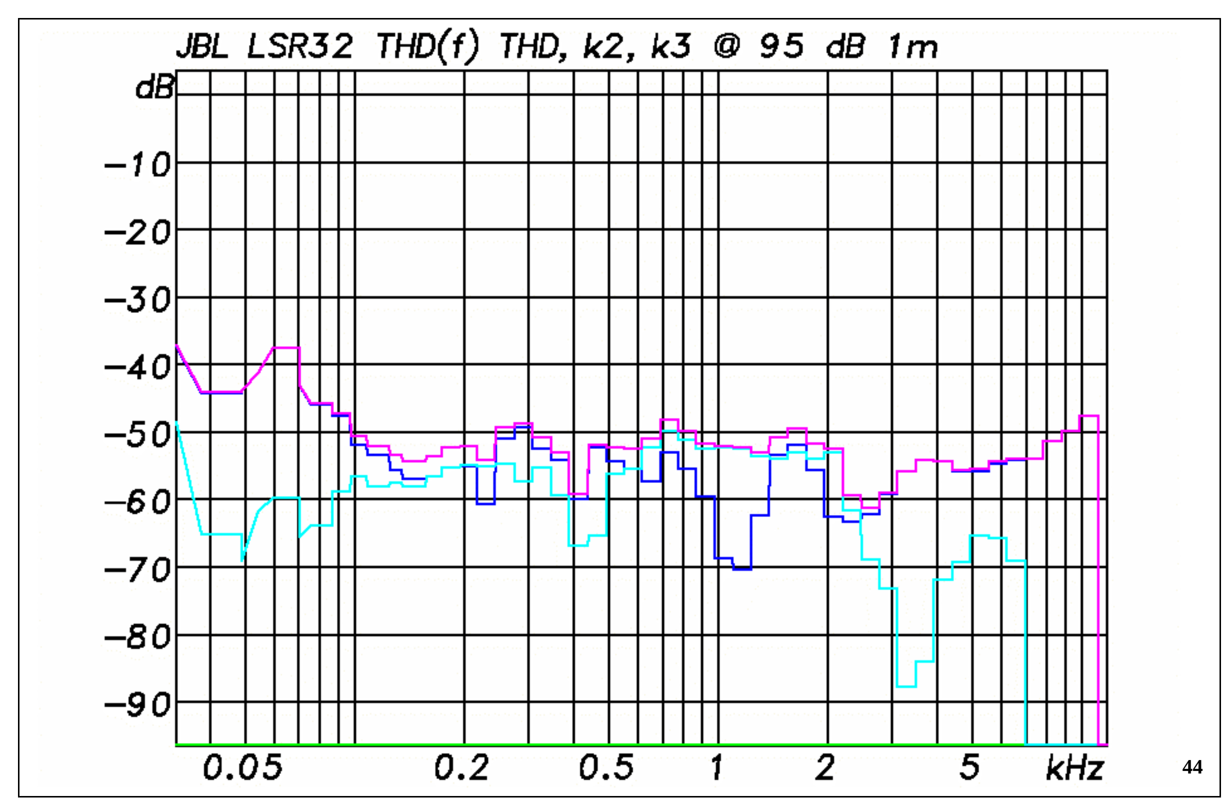


Abbildung 59 Klirrfaktorkurven eines Lautsprechers bei konstantem Eingangspegel entsprechend 95dB @ 1m @ 1 kHz

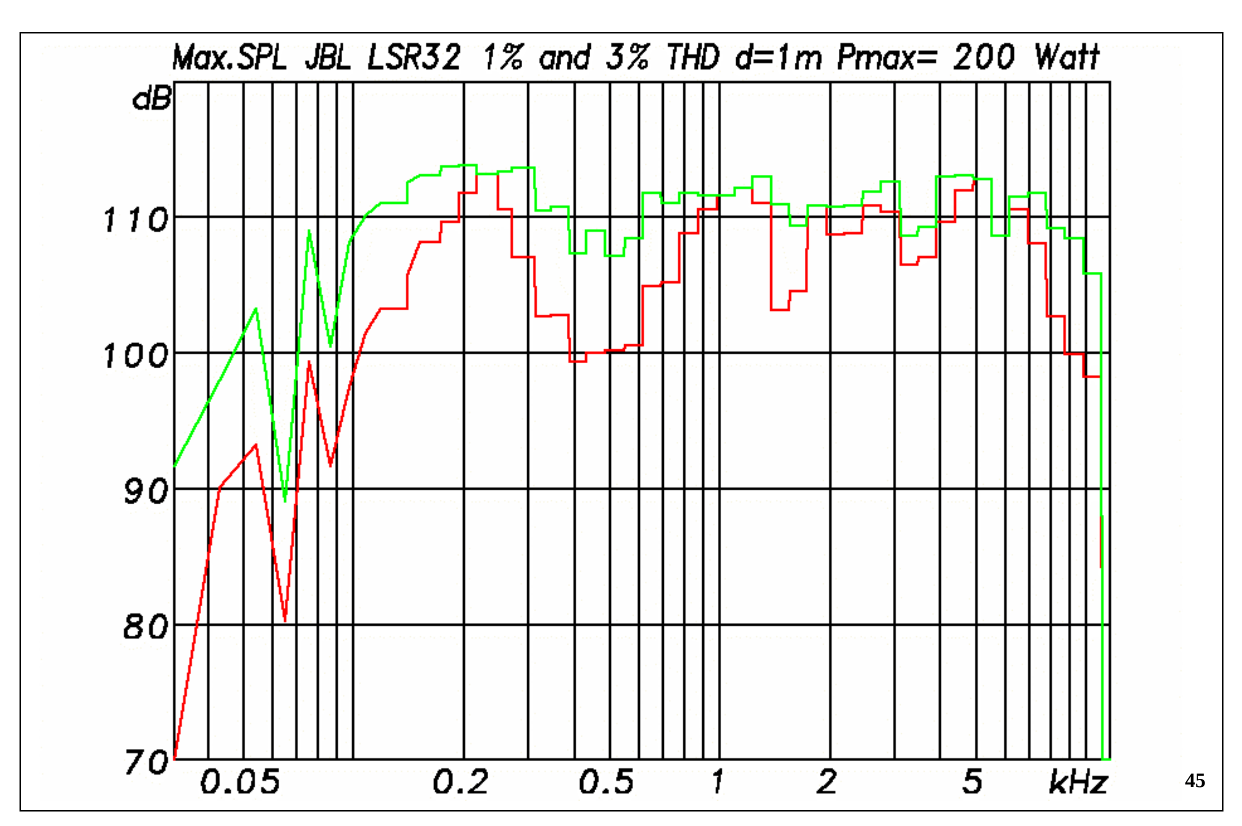


Abbildung 60 Maximalpegeldiagramm für 1% und 3% THD bei einem Lautsprecher (die Einbrüche bei 65 Hz und 85 Hz sind Artefacte des Meßraumes)

THD+N single f			
Excitation			
Mode	Single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Degree	13		FFT Länge = 2^{13} = 8192
Pre sends	1		Vorausgeschickte Meßperioden ohne Auswertung
Averaging	1		Mittelung über mehrere Messperioden
Excitation	1.0013 kHz		Anregungsfrequenz der Wert wird immer auf eine ganzzahlige Periodenanzahl innerhalb der FFT Länge gesetzt
Dither	No		Sinussignal mit einem Dither beaufschlagen
Level	0 dB FS ; 20 dBu		Ausgangspegel am Meßsystem in dB FS oder dBu
Display			
Dynamic range	140		Darstellungsbereich in dB
On top	5		Obere Grenze des Darstellungsbereiches
Normalize to 1V	Yes		No = Das Spektrum wird auf den unter Reference eingetragenen Wert normiert Yes = Die Normierung des gesamten Spektrums erfolgt auf 1V = 0 dBV, d.h. alle anderen

THD+N single f			
			Werte werden in ihrem Pegel auf den Gesamtwert der Grundwelle +THD oder +THD+N bezogen angezeigt.
Reference	S+THD		S+THD = nur die harmonischen Verzerrungen berücksichtigen S+THD+N = alle Verzerrungen und das Rauschen berücksichtigen
Info Window	Yes		Info Fenster bei der Messung einschalten
Show THD up to K	3		Einzelwerte für harmonische Verzerrungen bis zum eingestellten Grad im Infofenster anzeigen

Tabelle 25 Das *AD/DA* Menü *THD+N single f*

THD+N (f)			
Excitation			
Degree	13		FFT Länge = 2^{13} = 8192
Pre sends	1		Vorausgeschickte Meßperioden ohne Auswertung
Averaging	1		Mittelung über mehrere Messperioden
Dither	No		Sinussignal mit einem Dither beaufschlagen
Level	0 dB FS ; 20 dBu		Ausgangspegel am Meßsystem in dB FS oder dBu
Frequency range			
Lower cut off	21,53 Hz		Die Meßreihe beginnt bei dieser Frequenz
Upper cut off	11,00 kHz		Die Meßreihe endet bei dieser Frequenz
Steps	log		Lineare oder logarithmische Frequenzschritte
Frequ. increment	1/6-octave		Frequenzschrittweite
Display			
Dynamic range	140		Darstellungsbereich in dB
Reference	S+THD		S+THD = nur die harmonischen Verzerrungen berücksichtigen

THD+N (f)			
			S+THD+N = alle Verzerrungen und das Rauschen berücksichtigen
Show THD up to K	3		Einzelkurven für harmonische Verzerrungen bis zum eingestellten Grad in der Grafik anzeigen
Draw every time	Yes		Meßkurve während einer Meßreihe aufbauen
Info Window	Yes		Info Fenster bei der Messung einschalten

Tabelle 26 Das *AD/DA* Menü *THD+N (f)*

LS max SPL			
Measurement conditions			
Mic preamp gain	0 dB		Bei externem Mikrophon-Vorverstärker ist hier dessen Gain einzutragen
Correct by	0 dB		z.B. –6 dB bei Halbraummessungen
Mic-LS distance	1m		Entfernung vom Messmikrophon zur Lautsprecherfront
PA gain	26 dB		Verstärkung einer externen Endstufe
Excitation			
Degree	12		FFT Länge = 2^{12} = 4096
Averaging	1		Mittelung über mehrere Messperioden
Dither	No		Sinussignal mit einem Dither beaufschlagen
Recorvery (max)	2s		Pause zwischen zwei Messungen Maximaler Wert bei Erreichen des maximalen eingestellten Ausgangspegels, bei kleineren Pegeln entsprechend kürzere Zeiten
DA and PA level range			
Minimal ≤	-35 dB FS 0,94 W		Die Meßreihe beginnt bei diesem Wert (hier –32 dB FS)

LS max SPL			
			der entspricht bei dem angegeben Endstufengain von 26 dB einer Leistung von 0,94 Watt an einer Belastung von 8 Ohm
Maximal ≥	-6 dB FS 749 W		Die Meßreihe endet bei diesem Wert (hier 0 dB FS) der entspricht bei dem angegeben Endstufengain von 26 dB einer Leistung von 749 Watt an einer Belastung von 8 Ohm
Level increment	1 dB		Pegelschrittweite
Return to Min -	no		Bei jeder Frequenz die Meßreihe wieder beim minimalen Pegel beginnen
Frequency range			
Lower cut off	21,53 Hz		Die Meßreihe beginnt bei dieser Frequenz
Upper cut off	11,00 kHz		Die Meßreihe endet bei dieser Frequenz
Steps	Log		Lineare oder logarithmische Frequenzschritte
Frequ. increment	1/6-octave		Frequenzschrittweite
Display			
Dynamic range	50		Darstellungsbereich in dB
On top	140 dB		Maximalwert der Darstellung
Reference	S+THD		S+THD = nur die harmonischen Verzerrungen berücksichtigen

LS max SPL			
			S+THD+N = alle Verzerrungen und das Rauschen berücksichtigen
Show THD up to K	3		Einzelwerte für harmonische Verzerrungen bis zum eingestellten Grad im Infofenster anzeigen
Thresholds	3% 10%		SPL max Kurven für die hier eingestellten THD Werte ermitteln
Draw every time	Yes		Meßkurve während einer Meßreihe aufbauen
Info Window	No		Info Fenster bei der Messung einschalten

Tabelle 27 Das *AD/DA* **Menü** `LS max SPL`

Die Anregung mit Sinussignalen bei der Klirrfaktormessung erfordert mehr noch als bei einer Frequenzgangmessung eine völlig reflexionsfrei Umgebung. Eine Kurve entsteht durch eine Vielzahl einzelner Messungen mit diskreten Sinussignalen. Kommt es nun durch reflektierte Schallanteile zu Interferenzen mit dem Direktschall, so können bei einzelnen Meßpunkten durch Auslöschungen nahezu beliebige Meßfehler entstehen. Das Beispiel in Abbildung 60 zeigt solche Interferenzbrüche bei 65 Hz und 85 Hz, wo der Meßraum nicht mehr völlig reflexionsfrei ist. Die Grundregel lautet somit auch hier, daß der Abstand aller reflektierenden Flächen zum Meßaufbau groß gegenüber der Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrophon sein sollte. Bei großen Lautsprechern wird es nicht immer leicht fallen diese Bedingung zu erfüllen, wenn kein reflexionsarmer Raum zur Verfügung steht. Des weiteren sollte der maximale Schalldruck des Meßmikrophones beachtet werden.

Für Lautsprechermessungen empfiehlt sich eine Vorgehensweise, bei der zunächst eine Klirrfaktormessung bei konstanter Eingangsspannung über der Frequenz erstellt wird. Anhand der Kurven sind mögliche Schwachpunkte auch bei geringeren Pegeln bereits gut zu erkennen. Aus der eingestellten Ausgangsspannung des Meßsystems und dem Gain der nachfolgenden Endstufe läßt sich die dem Lautsprecher zugeführte Leistung

errechnen. Die untere Grenzfrequenz sollte dem Lautsprecher angepaßt sein und bei Bassreflexsystemen nicht weiter als eine halbe Oktave unterhalb der Tuningfrequenz liegen. Besondere Vorsicht ist bei Einzelmessungen von Mittel- und Hochtonwegen geboten. Auch hier sollte der Meßbereich nicht merklich unterhalb der Resonanzfrequenz beginnen. Die obere Grenzfrequenz limitiert sich durch die Abtastrate des Meßsystems auf ca. 11 kHz. Für höhere Frequenzen befinden sich sämtliche als Verzerrungen meßbaren Oberwellen oberhalb der halben Abtastrate und natürlich auch des Hörbereiches und können somit weder gehört noch durch dieses Meßsystem erfaßt werden. Für eine hinreichende Auflösung hat sich ein Abstand zwischen den Meßfrequenzen von 1/6 Oktave bewährt.

Eine sinnvolle Verwendung dieser Darstellung könnte es sein, eine Klirrfaktorkurve über der Frequenz bei einer konstanten Klemmenspannung an einer Box zu bestimmen, die einem bestimmten Schalldruck z.B. 95 dB in 1m Entfernung entspricht. Ein kleines Rechenbeispiel verdeutlicht diesen Zusammenhang. Ein passiver Nahfeldmonitor hat im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 10 kHz eine mittlere Empfindlichkeit von 89 dB @ 1W/1m. Ein typischer Arbeitspegel für diese Box wäre 95 dB in einer Entfernung von 1m. Der Lautsprecher wäre also mit einer Spannung zu messen, die einer Leistung von 4 Watt an der Nennimpedanz entspricht. Für einen 8 Ohm Lautsprecher entspricht das einer Klemmenspannung von 5,6 V_{eff} (= 17,26 dBu). Würde für diesen Fall eine Endstufe mit 26 dB Verstärkung eingesetzt, so wäre am Meßsystem unter *Level* ein Ausgangspegel von -8,74 dBu einzustellen.

Neben der Summen der Klirranteile können noch die Kurven der Oberwellen k2 bis k10 (*Show THD up to K*) einzeln dargestellt werden, so daß leicht abzulesen ist, welche Oberwellen den größten Anteil an der Summenkurve haben. Bei Lautsprechern sind k2 Anteile weniger kritisch zu bewerten, da sie nicht so sehr unangenehm auffallen und sogar in gewissen Grenzen den Lautheitseindruck erhöhen. Diese Meßreihe eignet sich somit insbesondere um die einzelnen Komponenten des Klirrfaktors zu beurteilen und zur Darstellung des Klirrfaktors bei einem typischen Arbeitspegel. Ein Beispiel für einen Studiomonitor bei 95 dB in einer Entfernung von 1m zeigt Abbildung 59. Hier sind neben der THD Kurve noch der Verlauf der Anteile 2.- und 3.-Ordnung k2 und k3 eingezeichnet.

Für den gleichen Lautsprecher wurde eine zweite Meßreihe durchgeführt, die für eine gegebene Klirrfaktorgrenze den maximalen Schalldruckpegel in 1m Entfernung ermittelt (siehe Abbildung 60). Zusätzlich zur Einstellung des Frequenzbereiches ist für diese Meßreihe noch der Pegelbereich anzugeben. Innerhalb dieser Grenzen sucht der Meßalgorithmus beginnend bei kleinen Werten nach dem maximal möglichen Schalldruck bei den gegebenen Klirrfaktorwerten. Der Ausgangspegel des Meßsystems

wird in der einstellbaren Schrittweite so lange erhöht, bis der Klirrfaktorgrenzwert erreicht wird, ein Limiter detektiert wird oder die eingestellte maximale Ausgangsspannung erreicht ist. Für PA Lautsprecher haben sich THD Grenzwerte von 3% und 10% bewährt. Bei Studiomonitoren oder HiFi Lautsprechern sind kleinere Wert von 1% und 3% zu empfehlen.

Achtung: Bevor eine Maximalpegelmessung gestartet wird, ist es ratsam, sich einige Gedanken zur Belastbarkeit des zu messenden Lautsprechers zu machen. Gefahren lauern für die Treiber zum einen durch eine mechanische Überlastung, was sich durch ein Aufschlagen der Schwingspule auf die Polplatte oder durch eine Reißen der Membran bemerkbar machen kann. Der zweite Gefährdungspunkt ist eine thermische Überlastung, bei der die Verlustleistung in der Schwingspule zur Überhitzung führt, die ein schlichtes Durchbrennen der Wicklung oder ein Ablösen der Windungen vom Spulenträger nach sich ziehen könnte. In Lautsprechern mit passiven Frequenzweichen oder Übertragen sind diese ebenfalls durch thermische Überlastung oder Überspannung gefährdet. HiFi Lautsprecher bedürfen bei dieser Messung einem besonderen Schutz, da diese Systeme im Gegensatz zu PA- oder Studio-Lautsprechern meist nicht über Schutzschaltungen verfügen. Grundsätzlich gilt, daß Tieftonchassis in der Regel eher mechanisch gefährdet sind, wogegen Mittel- und Hochtöner primär durch eine thermische Überlastung bedroht sind. Hohe Pegel im Bassbereich verlangen von den Treiber große Membranauslenkungen, die in den Grenzbereichen für heftigen Klirrfaktor sorgen, so daß der Meßalgorithmus automatisch abbricht. Für Mittel- und Hochtonsystem trifft dieses nicht immer zu. Das Meßsystem steigert daher den Pegel unter Umständen so weit, daß die leichten Schwingspulen der Hochtöner die Wärme nicht mehr ausreichend abführen können. Zum Schutz vor zu hohen Leistung kann die maximale Ausgangsspannung begrenzt werden. Im zugehörigen Fenster unter *DA and PA level range* wird der Wertebereich mit seinem unteren und oberen Grenzwert in dB FS bezogen auf die maximale Ausgangsspannung des Meßsystems angegeben. Zusätzlich gibt es eine Leistungsangabe in Watt, die sich aus dem unter *PA gain* eingestellten Verstärkungswert der Endstufe und dem Ausgangspegel des Meßsystems bezogen auf eine 8 Ohm Last ergibt. Die SPL Max Messung kann nur einkanalig und ohne Auto Range Funktion ausgeführt werden. Das während der Messung optional einzublendende Infofenster zeigt unter Status Bereichsüberschreitungen an. Folgende Informationen werden angezeigt.

Info Fenster bei SPL Max Messungen			
Distortion			
Frequency	in Hz		Aktuelle Meßfrequenz

Info Fenster bei SPL Max Messungen			
DA level	in dB FS		Ausgangspegel am Meßsystem bezogen auf FS
PA power	in Watt		Ausgangsleistung berechnet aus dem Meßpegel und dem Endstufengain bezogen auf eine 8 Ohm Last
SPL (1m)	in dB		Aktueller Schalldruck in 1m Entfernung
Sens. (1m)	in dB		Aus dem aktuellen Schalldruck und der Leistung zurückgerechnete Sensitivity des Lautsprechers. (Im Vergleich zur Sensitivity bei 1W/1m läßt dieser Wert Rückschlüsse auf eine Powercompression zu.)
Status	NOSIG LIM CLIP UNDER OVER		Kein Eingangssignal Limiter in der Signalkette detektiert Clippen in der Signalkette detektiert Klirrfaktorgrenzwert schon beim kleinsten Pegelwert erreicht Klirrfaktorgrenzwert auch beim größten Pegelwert nicht erreicht
Ch 0			
K2	Wert in dB		Klirranteil 2.Ordnung bezogen auf die Grundwelle
K3	Wert in dB		Klirranteil 3.Ordnung bezogen auf die Grundwelle
K...	Werte in dB		Weitere harmonische Verzerrungen bis max. 10.Ordnung
Σ-K	Wert in dB		Summe aller harmonischen Klirranteil bezogen auf den Gesamtpegel
THD+N/S	Wert in dB		Summe aller Klirr- und Störanteile

Info Fenster bei SPL Max Messungen			
			bezogen auf die Gesamtpegel des Meßsignales

Tabelle 28 Info Fenster bei der SPL Max Messung

Die im Infofenster angezeigten Leistungs- und Sensitivitywerte sind nur dann richtig, wenn sich nur ein einzelner Lautsprecher mit einer Endstufe in der Meßkette befindet. Aktive Systeme mit mehreren Endstufen oder vorgeschalteten Controllern erlauben wegen der frequenzabhängigen Verstärkungswerte keine Aussage. Den Fullscale (FS) Wert für den Ausgang des Meßsystems stellt man in gewohnter Weise unter *AD/DA* bei `Basic settings` ein. Ein *DA fullscale* Wert von +20 dBu sollte hier auch bei Endstufen mit geringen Verstärkunswerten ausreichend sein.

Der unter *PA gain* eingestellte Wert hat keinen Einfluß auf die Richtigkeit der SPL max Messung. Unbedingt zu beachten sind dagegen die Einstellungen für *Mic preamp gain* und für die *Mic-LS distance*. Die Mikrophonempfindlichkeit ist im *AD/DA* Menu unter `Miscellaneous` einzustellen.

8.10 Impedanzmessungen und Thiele Small Parameter

Impedanzmessungen können mit MF und der zugehörigen Hardware sehr schnell und einfach durchgeführt werden. Die Standardeinstellung sind bereits so gewählt, daß für Impedanzmessungen an Lautsprechern günstige Bedingungen herrschen.

Der Meßvorgang gestaltet sich hier ähnlich wie in den anderen Menüs. Zunächst wird eine Referenzmessung an einem bekannten Widerstand ausgeführt, die dann als Bezugsgröße für alle weiteren Messungen dient. Neben dem Referenzwiderstand gibt es noch den in Reihe zum Meßobjekt geschalteten Shuntwiderstand, an dem der Spannungsabfall gemessen wird. Grundlage für die Impedanzmessung an unbekannten Meßobjekten sind somit die Referenzmessung, der Referenzwiderstand und der Shuntwiderstand. Äußerlich gibt sich alles sehr einfach, wo das Meßobjekt nur an die Bananenbuchsen an der Rückwand des Frontends anzuklemmen ist. Die Verstärkung der Endstufe sollte dabei auf 20 dB (Cal.) gestellt sein und der Meßpegel auf –10...-20 dBu. Sobald die Referenzmessung gestartet wird, schaltet das Frontend automatisch den Referenzwiderstand von 10 Ohm anstelle des Meßobjektes an den Ausgang. Für die Referenzmessung ist es nicht notwendig das Meßobjekt abzuklemmen, da die Ausgänge während der Referenzmessung automatisch abgeschaltet werden. Die Meßgröße wird über dem ebenfalls im Frontend integrierten Shuntwiderstand von 1 Ohm abgegriffen. Der Referenzmodus wird durch die rote Led 10Ω Cal. an der Frontplatte angezeigt. Mit den Standardeinstellungen sollte das Resultat der Referenzmessung frei von Störanteilen und Verzerrungen sein (siehe Abbildung 61). Für Impedanzmessungen empfiehlt sich der Autorange Modus (Menu: `AD/DA Basic settings`).

Im folgenden kann nun das eigentlich Testobjekt gemessen werden. Die Spannung an den Ausgängen errechnet sich aus der unter *Level* im Referenzmenu eingestellten Spannung zuzüglich der 20 dB Verstärkung der Endstufe.

AD/DA Impedance			
Excitation			
Mode	Single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Pre sends	1		Vorab ausgesendete Anzahl Maximalfolgen
Averaging	1		Anzahl der Messungen über die

AD/DA Impedance			
			gemittelt wird
Impulse response processing			
Build imp. resp.	Pre comp		Impulsantwort aus dem kompensierten Frequenzgang neu berechnen
Window	Yes		Fensterfunktion für die Impulsantwort
Type	Bl-H. 4-Term right slope Start: 70 ms Lenght: 30 ms		Fenstertyp, Startzeit und Länge (Die Standardeinstellung sind für Impedanzmessungen an Lautsprechern optimal)
Spectral processing			
Equalizing File	IMPCO15.SPK		Dateiname der Referenzmessung
Smooth	No		Glättung (Vorsicht: Die Glättung kann bei schmalen Impedanzmaxima zu größeren Fehlern führen)
Display			
On top	50 Ohm		Darstellungsbereich
Info Window	no		Infofenster

Tabelle 29 Das Menu AD/DA Impedance

AD/DA Impedance reference			
Excitation			
Degree	15		Grad des Anregungssignales Auflösung $\Delta f = f_t/2^{Grad}$ Standard: $\Delta f = 44k1/2^{15} = 1{,}35$ Hz
Exciter	MLS		Anregungssignale: Impulse Dirac Impulse

AD/DA Impedance reference			
			2^n-Signal Multisinussignale aus einer Datei, die vorab erzeugt werden muß (siehe auch Kap. 8.15) MLS ungewichtete Maximalfolgen
Origin	Internal		Quelle des Anregungssignale: Intern wird automatisch beim Aufruf der Messung im Rechner erzeugt File das Signal wird als Zeitsignal aus einer Datei geladen (siehe auch Kap. 8.15) Ext. Hardware externer Hardwaregenerator
Level	-10 dB FS		Meßsignalpegel in dB FS oder in dBu
Interleave	1		Interleavesampling für externe Anregungssignale mit einer ganzzahlig vielfach höheren Abtastrate zur Erweiterung des Meßbereiches in gesonderten Anwendungsfällen
Equalization			
Equalizing File	IMPCO15.SPK		Datei für die Referenzmessung
Lower cut off	1 Hz		Untere Grenze der Kompensation (kleinster Wert ist ca. 1 Hz, da das Frontend nicht DC-gekoppelt ist)
Upper cut off	22.05 kHz		Obere Grenze der Kompensation (größter Wert ist ca. 22 kHz, entsprechend der halben Abtastrate)
Reference R	10 Ohm		Referenzwiderstand (ist im Frontend eingebaut und wird bei der Referenzmessung automatisch anstatt des Meßobjektes zugeschaltet)

AD/DA Impedance reference			
Shunt R	1 Ohm		Vorwiderstand für die Strommessung (ist im Frontend eingebaut und wird bei Impedanzmessungen automatisch mit dem Meßobjekt in Reihe geschaltet)

Tabelle 30 Das Menu AD/DA Impedance reference

Abbildung 62 zeigt exemplarisch das Resultat einer Impedanzmessung an einer kleinen Bassreflexbox. Das Ergebnis liegt immer in komplexer Form vor, so daß neben der Betragsdarstellung (Ctrl M) auch die Phase (Ctrl P) bzw. der Real- (Ctrl R)oder Imaginäreil (Ctrl I)betrachtet werden können. Ebenso kann die Darstellung der Impedanz über der Frequenz in Form einer Ortskurve bzw. eines Nyquist Plots (Ctrl O)erfolgen.

Impedanzmessung beherbergen einige potentielle Fehlerquellen, die einer kurzen Erwähnung bedürfen. Der gemessene Wert bezieht sich immer auf alles, was sich an den Anschlußbuchsen im Frontend befindet, womit auch Kabelwiderstände oder Übergangswiderstände an Steckverbindungen etc. mit in das Meßergebnis eingehen. Der hierdurch entstehende Fehler wirkt sich relativ betrachtet um so kritischer aus, je kleiner der Widerstand des Meßobjektes ist. Für einen Lautsprecher mit einer Nennimpedanz von 2 Ohm würde sich ein typischer Restwiderstand der Kabel und Stecker von 0,4 Ohm schon als 20% Fehler bemerkbar machen. Um diesen Fehler zu vermeiden, kann zunächst eine Messung mit kurzgeschlossenen Klemmen direkt am Meßobjekt gemacht werden, die dann in einer eigenen Datei abgespeichert wird und später von den Messung subtrahiert werden kann.

Des weiteren können Impedanzmessungen durch das nichtlineare Verhalten bei Lautsprechern gestört werden. Die einzelnen Elemente im Ersatzschaltbild dürfen nicht als absolut konstant betrachtet werden. Vielmehr gibt es verschiedenste Abhängigkeit, z.B. von der Mebranauslenkung, die mehr oder weniger starke Nichtlinearitäten verursachen können. In einer Impedanzkurve äußern sich diese, ähnlich wie Verzerrung bei der Frequenzgangmessung, durch einen buschigen Kurvenverlauf. Besonders kritisch reagieren offene Chassis bei der Impedanzmessung, wenn die Membran schon bei kleinen Pegeln große Auslenkungen ausführt. Für diesen Fall muß der Meßpegel solange abgesenkt werden, bis die Verzerrungen auf ein entsprechend niedriges Maß abgefallen sind. Bei Bedarf kann gleichzeitig die Anzahl der Mittelungen unter *Averaging* erhöht werden. Der Meßpegel sollte dabei immer per Software in der Level Einstellung variiert werden und nicht über das Poti für das Endstufengain. Eine neue Referenzmessung ist

dann nicht erforderlich. Abbildung 62 zeigt das Resultat einer Impedanzmessung an einer kleinen Bassreflexbox mit einer Tuningfrequenz von ca. 110 Hz im Impedanzminimum.

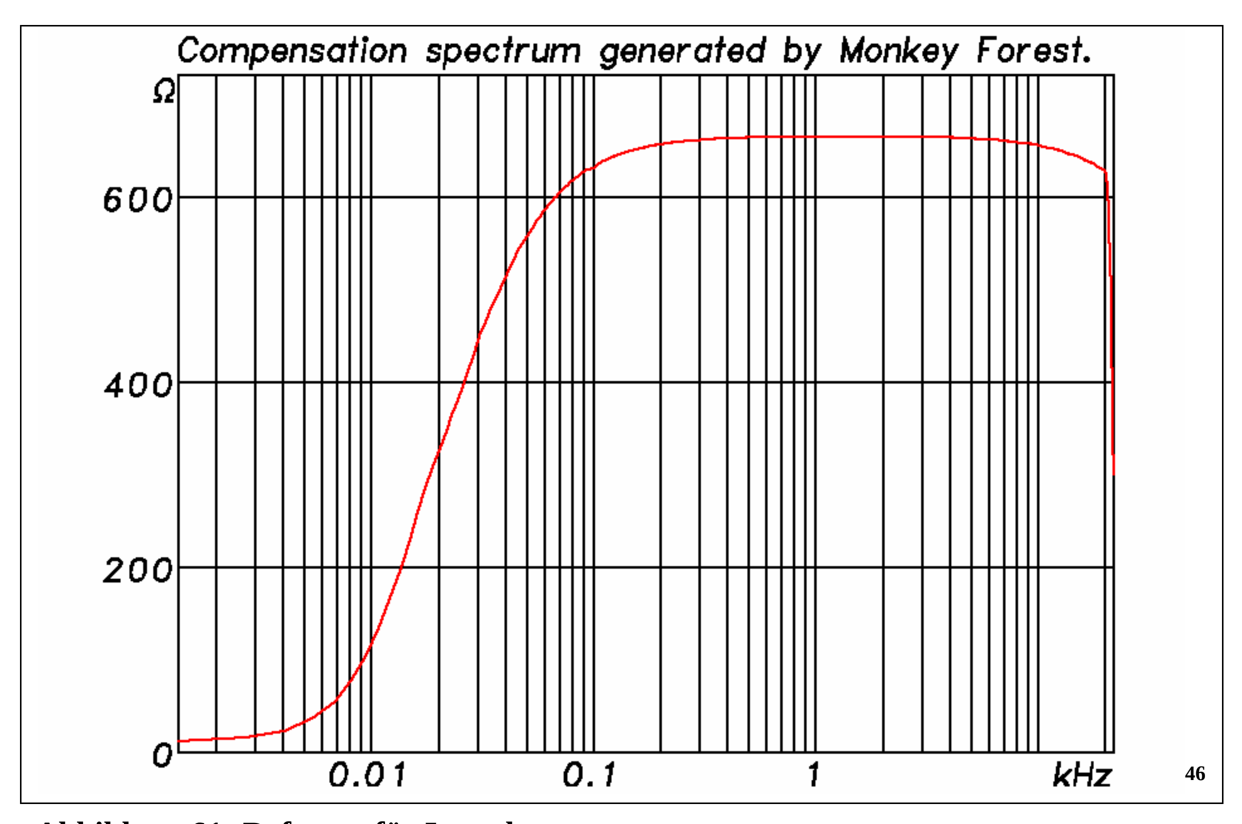


Abbildung 61 Referenz für Impedanzmessung

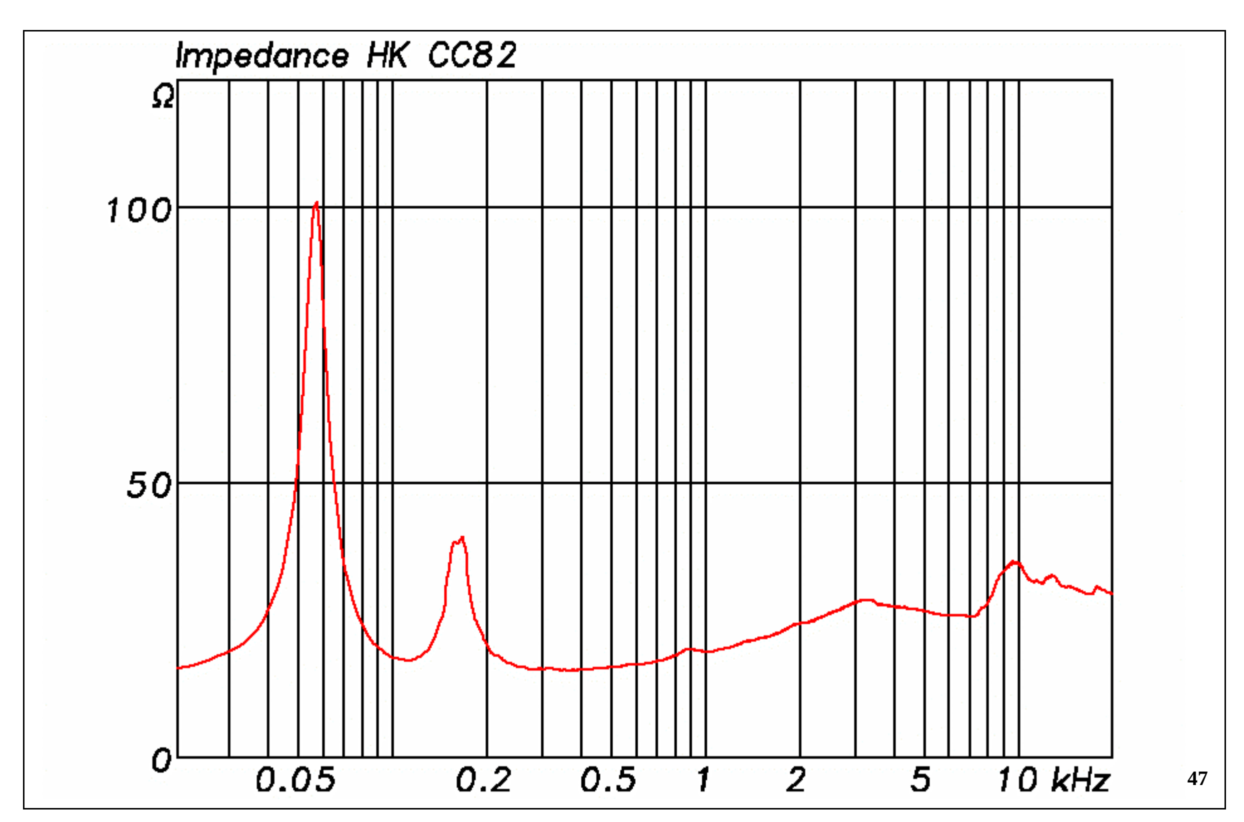


Abbildung 62 Impedanzmessung an einer kleinen Baßreflexbox

MF bietet die Möglichkeit einer schnellen Bestimmung der Thiele Small Parameter über zwei Impedanzmessung am nicht eingebauten Treiber. Das Chassis ist dabei frei stehend zu betreiben. Lüftungsöffnungen im Polkern des Magnete dürfen nicht verschlossen werden, wenn der Lautsprecher z.B. mit dem Magneten auf einem Tisch abgelegt wird. Ansonsten würde sich hier ein im normalen Betrieb nicht vorhandenes Luftpolster ausbilden, was eine zusätzliche Federwirkung verursachen könnte. Die erste Impedanzmessung wird dann am unveränderten Chassis vorgenommen. Die resultierende Kurve zeigt in ihren wichtigsten Strukturen die Resonanzfrequenz beim Impedanzmaximum und den Impedanzanstieg zu hohen Frequenzen durch die Schwingspuleninduktivität. Bei der Resonanzfrequenz ist zu beachten, daß der Wert bei nicht eingelaufenen neuen Chassis meist noch ein wenig höher liegt als im Datenblatt angegeben. Vor einer Impedanzmessung kann ein solches Chassis daher zunächst einige Stunde mit einem sehr tieffrequenten Sinussignal (5 Hz) bei geringem Pegel, aber so, daß eine deutliche Membranauslenkung sichtbar wird, eingefahren werden.

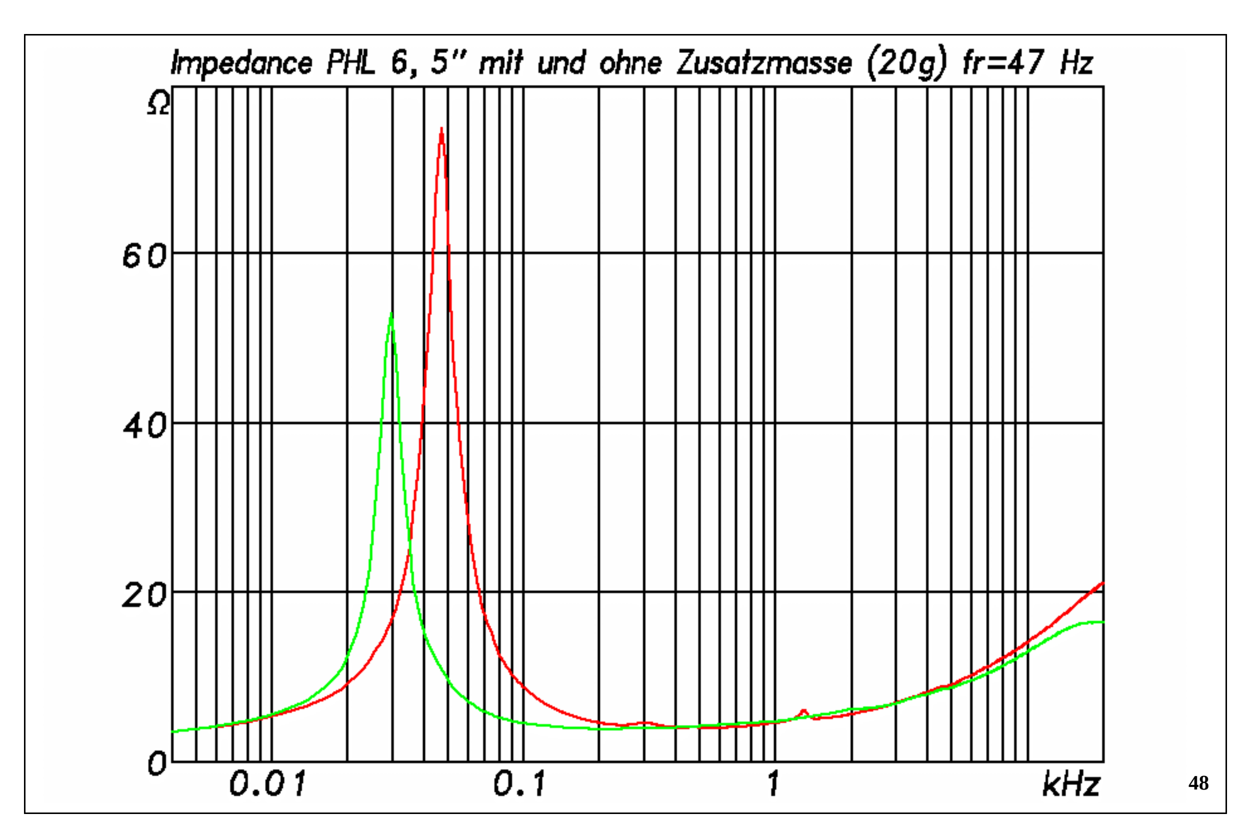


Abbildung 63 Impedanzmessungen mit und ohne Zusatzmasse

Vereinfacht betrachtet handelt es sich bei einem Lautsprecher um ein Feder-Masse-System mit einer Resonanzfrequenz. Bestimmt wird diese Resonanz durch die bewegte dynamische Masse aus Membran, Spule, Teilen der Aufhängung sowie durch die mitbewegte Mediummasse der Luft. Die Feder für das nicht eingebaute Chassis wird primär durch die Zentrierspinne des Lautsprechers bestimmt. Um die einzelnen Größen der bewegten Masse und der Nachgiebigkeit bestimmen zu können, bedarf es einer zweiten Messung, bei der eine dieser Größen um einen bekannten Wert verändert wird. Hier gibt zwei Möglichkeiten. Durch den Einbau in ein geschlossenes Gehäuse mit einem bekannten Volumen kann die Federsteife durch die Luftfeder erhöht werden. Die Resonanzfrequenz bei der Impedanzmessung des im Gehäuse eingebauten Chassis steigt in diesem Fall. Die zweite und einfachere Variante besteht darin, die bewegte Masse durch eine Zusatzmasse bekannten Gewichtes zu vergrößern. Die zweite Impedanzmessung mit Zusatzmasse weist dann eine niedrigere Resonanzfrequenz auf. Dieses Verfahren wird von MF unterstützt, so daß zwei Impedanzmessung des Chassis im nicht eingebauten Zustand mit und ohne Zusatzmasse gemacht werden müssen. Das Gewicht der Zusatzmasse sollte sich in der Größenordnung der bewegten Masse des Lautsprechers bewegen. Bewährt hat sich einfache Knetmasse, die sich leicht formen läßt, eine gute Verbindung zur Membran bekommt und auch rückstandsfrei wieder zu beseitigen ist. Zu einer langen Rolle geformt, wird die Knetmasse am günstigsten in der Falz an der Membran um die Staubschutzkalotte gelegt und leicht angedrückt.

Beide Impedanzmessung sind dann in getrennten Dateien oder in zwei Kanälen einer Datei abzuspeichern. Die Reihenfolge ist dabei gleichgültig. Sind beide Kurven geladen, wie auch in Abbildung 63 dargestellt ist, kann im Menü `Info Loudspeaker param` das folgende Fenster aufgerufen werden.

```
Impedance PHL 6,5" mit und ohne Zusatzmasse (20g) fr=47 Hz

Region         : cursor/fixed
Lower limit    :    4.0375 Hz
Upper limit    :   20.0003 kHz
Diameter       :       163 mm
Added weight   :        20 g
------ Thiele Small Parameter -----
f s            :   46.4478 Hz
R DC           :    3.2251 ê
Q MS           :      4.99
Q ES           :      0.23
Q TS           :      0.22
V AS           :   54.1542 l
----- More parameters -----
M dyn          :   13.3617 g
C MS           :  878.7157 æm/N
R ms           :  781.7737 mNs/m
Bl             :    7.6147 Vs/m

Quit
```

Abbildung 64 Thiele Small Parameter ausgedruckt über MF.PRO File (`Ctrl Print` Taste kopiert den aktuellen Fensterinhalt)

Hier sind zunächst einige Einstellungen vorzunehmen. *Lower Limit* und *Upper Limit* betreffen den zur Auswertung betrachteten Frequenzbereich. Die obere Grenze ist dabei weniger wichtig als die untere, da hier der Gleichstromwiderstand der Spule R_{DC} abgelesen wird. Werte zwischen 1 Hz und 4 Hz haben sich für das *Lower Limit* und zwischen 1 kHz und 20 kHz für *Upper Limit* als günstig erwiesen. Weiterhin sind der Membrandurchmesser und das Gewicht der Zusatzmasse einzutragen. Wenn die beiden Resonanzspitzen in den Impedanzkurven mit und ohne Zusatzmasse nicht weit genug auseinander liegen, wird die Parameterbestimmung zunehmend ungenau. Als Faustregel gilt hier, daß die Resonanzfrequenz mit Zusatzmasse kleiner als das 0,7-fache der Resonanzfrequenz ohne Zusatzmasse sein sollte. Der Membrandurchmesser sollte so gemessen werden, daß ca. die Hälfte der Sicke mit in das Ergebnis eingeht. Anschließend sind die Parameter, wie in Abbildung 64 dargestellt, im Fenster *Loudspeaker Parameters* abzulesen. Über die Tastenkombination `Ctrl Print` wird der Fensterinhalt und die Kommentarzeile der aktuellen Datei in einer ASCII Datei Namens MF.PRO kopiert und steht zur weiteren Dokumentation und Verarbeitung bereit. Eine bereits bestehende MF.PRO Datei wird dabei nicht überschrieben. Die aktuellen Fensterinhalte werden lediglich an die bestehenden angehängt. Tip: Mit dieser Protokollfunktion ist es möglich,

sämtliche Fenster mit den aktuellen Einstellungen in das Protokollfile zu übertragen, so daß komplette Arbeitsabläufe dokumentiert werden können.

8.11 Störabstand S/N und Störspektren messen

Der Störabstand bzw. Dynamikumfang stellt bei Audiogeräten ein wesentliches Qualitätsmerkmal dar. Der Dynamikumfang bestimmt sich aus der maximal möglichen Ausgangsspannung knapp unterhalb der Übersteuerungsgrenze und dem im Ruhezustand anliegenden Störpegel. Ein Equalizer z.B. liefert eine maximale Ausgangsspannung von 21 dBu an seinen Ausgängen. Das entspricht einer Spannung von 8,7 V_{eff} oder 12,3 V_s. Ein Wert von 0 dBu entspricht 775mV_{eff} was gleichbedeutend ist mit einer Leistung von 1 mW an einer 600 Ohm Last. Der Störpegel ist nun die Summe aller Störanteile aus Rauschen, Brummen usw., die am Ausgang anliegen, wenn kein Eingangssignal vorhanden ist. Die Eingänge sollte dabei niederohmig abgeschlossen oder kurzgeschlossen werden, um Einstreuungen, die das Meßergebnis verfälschen könnten, zu vermeiden. Keinesfalls sollte der Ausgang des Meßsystems mit den Eingängen des zu messenden Gerätes verbunden bleiben, da sonst das Eigenrauschen der DA-Umsetzer mit in die Messung eingehen würde.

Im MF erfolgt die Auswertung über eine FFT Analyse des Störpegels, so daß zunächst ein Störspektrum ermittelt wird, wie es in Abbildung 65 dargestellt ist. Die linke Kurve zeigt das Spektrum ohne Bewertung, die rechte Kurve mit einer A-Bewertung. Die A-Kurve (siehe Abbildung 66) repräsentiert die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Ohres und gewichtet somit diejenigen Anteile, für die das Ohr besonders empfindlich ist, stärker und diejenigen, wo das Ohr unempfindlicher ist, entsprechend weniger stark. Die A-Gewichtung kann schon während der Messung eingeschaltet werden oder später über *Edit A-weighting* in das Spektrum hinein multipliziert werden oder auch wieder rückgängig gemacht werden über *Edit A-unweighting*. Eine A-Gewichtung wird durch ein A links oben am Bildschirmrand angezeigt. Die Pegelstatistik des Spektrums kann bei eingeschaltetem Info Fenster direkt während der Messung abgelesen werden oder später über das Menü *Info* unter *Spectral statistics*.

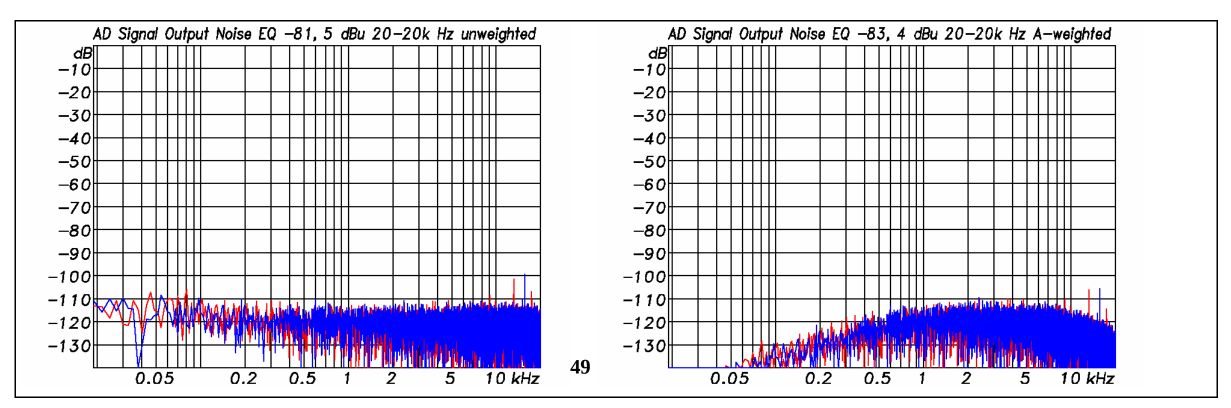


**Abbildung 65 Störspektrum am Ausgang eines EQ
links: (20 Hz bis 20 kHz unweighted) Overall Level -81,5 dBu
rechts: (20 Hz bis 20 kHz A-weighted) Overall Level -83,4 dBu**

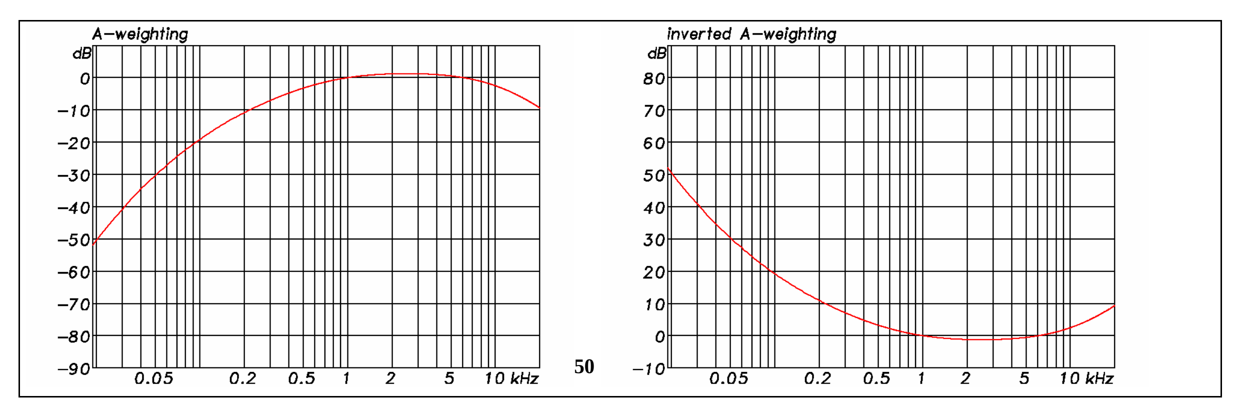


Abbildung 66 A-Kurve und invertierte A-Kurve

In MF erfolgt die Messung von beliebigen Signalspektren im `AD/DA` Menu unter `AD only`. Vor einer Messung sollte bei offenen Eingängen am Frontend der Störpegel des Meßsystems geprüft werden. Der Wert sollte merklich unter dem des angeschlossenen Gerätes liegen. Der AD-Umsetzer des Meßsystems stellt einen Dynamikumfang von ca. 80 dB zur Verfügung, der über die Vorverstärker im Frontend in weiten Bereichen angepaßt werden kann. Die Eingangsempfindlichkeit des Meßsystems kann von MF aus im Menu `AD/DA` unter `Basic settings` zwischen -62,5 dBu und +40 dBu für Vollaussteuerung variiert werden. Bei geringen Verstärkungen der Vorstufe dominiert der AD-Umsetzer den Störpegel des Meßsystems und bei hohen Verstärkungswerten der Vorverstärker. Die folgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick über die Störpegel bei unterschiedlichen Eingangsempfindlichkeiten für das 16-Bit System.

Eingangsempfindlichkeit in dBu	Störpegel in dBu 20-20k Hz unweighted	Resultierende Meßdynamik in dB
+40 dBu (=77,5 V_{eff})	-35 dBu	75 dB

Eingangsempfindlichkeit in dBu	Störpegel in dBu 20-20k Hz unweighted	Resultierende Meßdynamik in dB
+20 dBu (=7,75 V_{eff})	-55 dBu	75 dB
0 dBu (=775 mV_{eff})	-75 dBu	75 dB
-20 dBu (=77,5 mV_{eff})	-94 dBu	74 dB
-40 dBu (=7,75 mV_{eff})	-108 dBu	68 dB

Tabelle 31 Meßdynamik und Störpegel des 16-Bit Systems bei unterschiedlichen Eingangsempfindlichkeiten

Wie sich aus der Tabelle erkennen läßt, sind Messung von sehr geringen Pegeln in der Größenordnung von –100 dBu möglich. Die Autorange Funktion kann auch hier eingesetzt werden und schaltet automatisch auf den günstigsten Arbeitsbereich. Unter bestimmten Randbedingungen kann es allerdings im Autorangebetrieb dazu kommen, daß die automatische Anpassung der Eingangsempfindlichkeit keine sinnvolle Einstellung findet. Die Verstärkung wird dann ständig ohne endgültiges Resultat umgeschaltet. Für diesen Fall ist der Autorange Modus abzuschalten und die Eingangsempfindlichkeit von Hand einzustellen.

Im *AD/DA* Menu unter *AD only* finden sich folgende Einstellungsmöglichkeiten:

AD only			
Excitation			
Mode	Single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Averaging	1		Anzahl der Messungen über die gemittelt wird Eine Verdopplung der Meßabläufe reduziert den Störpegel jeweils um 3 dB
AD decimation %	1		Reduzierung der Abtastrate Die Bandbreite wird entsprechend kleiner Die Auflösung wird entsprechend größer
Length	371,5 ms		Länge des ausgewerteten Zeitsignales

AD only			
Samples/channel	16384		Anzahl der Samples = 2^n
Remove DC	Yes		Gleichanteil vom Zeitsignal abziehen
Windowing			
Window	No		Fensterfunktion für die Impulsantwort
Type	Bl-H. 4-Term symmetrical Range: all		Fenstertyp und Form
Spectral processing			
Equalizing	None		None: keine Bewertung im Frequenzbereich File: Bewertung über eine vorgegebene Spektrumsdatei A-weigh: A-Bewertung Sinc(x): (sin x)/x Bewertung J-filt: Bewertung über ein mit J-Filter definiertes Filter (siehe auch 10.4)
Smooth	No		Glättung im Frequenzbereich
Channel combine	none		Ch0 und Ch1 bei zweikanaliger Messung miteinander verknüpfen
Display			
Dynamic Range	140 dB		Darstellungsbereich
On top	20 dB		Maximalwert des Darstellungsbereiches
Ref. for 0 dB	0 dBu		Bezugswert für 0 dB Max: größter Wert im Spektrum Fixed: einstellbarer Wert 0 dBu: 775 mV AD FS: AD-Umsetzer Vollausst.

AD only			
dB reference	0 dBu		Einstellbarer Bezugswert für 0 dB bei fixed
Info Window	no		Infofenster

Tabelle 32 Das Menu `AD/DA AD only` mit Standardeinstellungen

Während der Messung können jetzt schon im Infofenster diverse statistische Werte des Signales abgelesen werden. Der bewertet Frequenzbereich wird unter Lower und Upper Limit angezeigt und kann vorher im Menu *Info* unter *Spectral statistics* eingestellt werden. Wird die Spektrumsdatei abgespeichert, so können auch später jederzeit die Werte über dieses Menu abgefragt und der Frequenzbereich geändert werden. Der gemessene Störpegel kann als Spannungswert oder Pegelwert in dBu unter Overall abgelesen werden. Die typischen Meßwerte werden mit einer FFT Länge von 16K ermittelt und in einem Bereich von 20 Hz bis 20 kHz bewertet. Eine optionale A-Gewichtung kann jederzeit über das *Edit* Menu für bestehende Datei zugeschaltet werden oder direkt bei der Messung ausgewählt werden. Die A-Gewichtung kann ebenso über das Edit Menu wieder rückgängig gemacht werden.

Soll neben dem Störpegel noch der Dynamikumfang bzw. Signal/Störabstand eines Gerätes bestimmt werden, dann ist als zweiter Meßwert noch die maximale unverzerrte Ausgangsspannung zu messen. Im *AD/DA* Menü findet sich die Funktion *THD+N single f* , mit der für eine feste Frequenz z.B. 1 kHz der Klirrspektrum analysiert werden kann.

Die folgende Tabelle zeigt die Einstellung in der *THD+N single f* Funktion.

THD+N single f			
Excitation			
Mode	Single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Degree	13		FFT Länge = 2^{13} = 8192
Pre sends	1		Vorausgeschickte Meßperioden ohne

THD+N single f			
			Auswertung
Averaging	1		Mittelung über mehrere Meßperioden
Excitation	1.0013 kHz		Anregungsfrequenz der Wert wird immer auf eine ganzzahlige Periodenanzahl innerhalb der FFT Länge gesetzt
Dither	No		Sinussignal mit einem Dither beaufschlagen
Level	0 dB FS ; 20 dBu (bei Bedarf reduzieren)		Ausgangspegel am Meßsystem in dB FS oder dBu
Display			
Dynamic range	140		Darstellungsbereich in dB
On top	30		Obere Grenze des Darstellungsbereiches
Normalize to 1V	No		No = Das Spektrum wird auf den unter Reference eingetragenen Wert normiert Yes = Die Normierung des gesamten Spektrums erfolgt auf 1V = 0 dBV, d.h. alle anderen Werte werden in ihrem Pegel auf den Gesamtwert der Grundwelle +THD oder THD+N bezogen angezeigt.
Reference	S+THD		S+THD = nur die harmonischen Verzerrungen berücksichtigen S+THD+N = alle Verzerrungen und das Rauschen berücksichtigen
dB Reference	775 mV		Bezugswert für Normierung

THD+N single f			
			(775 mV für dBu)
Info Window	Yes		Info Fenster bei der Messung einschalten
Show THD up to K	3		Einzelwerte für harmonische Verzerrungen bis zum eingestellten Grad im Infofenster anzeigen

Tabelle 33 Das *AD/DA* Menü *THD+N single f*

Mit den oben gezeigt Einstellungen wird das Signalspektrum auf 775 mV bezogen d.h. in dBu angezeigt. Über die Leveleinstellung oder einen Pegelsteller am Meßobjekt kann der Ausgangspegel so lange gesteigert werden, bis durch einen plötzlichen Anstieg der Verzerrungsanteile zu erkennen ist, daß die Aussteuerungsgrenze erreicht wurde. Knapp unterhalb dieses Grenzwertes, z.B. bei 0,1% bzw. -60 dB THD kann dann der Pegel der Grundwelle abgelesen werden. Während der laufenden Messung oder auch danach geschieht das durch ein Plazieren des aktiven Cursors mit ↑M auf der Frequenzlinie der Grundwelle, so daß Frequenz, Spannung und Pegel direkt abgelesen werden können.

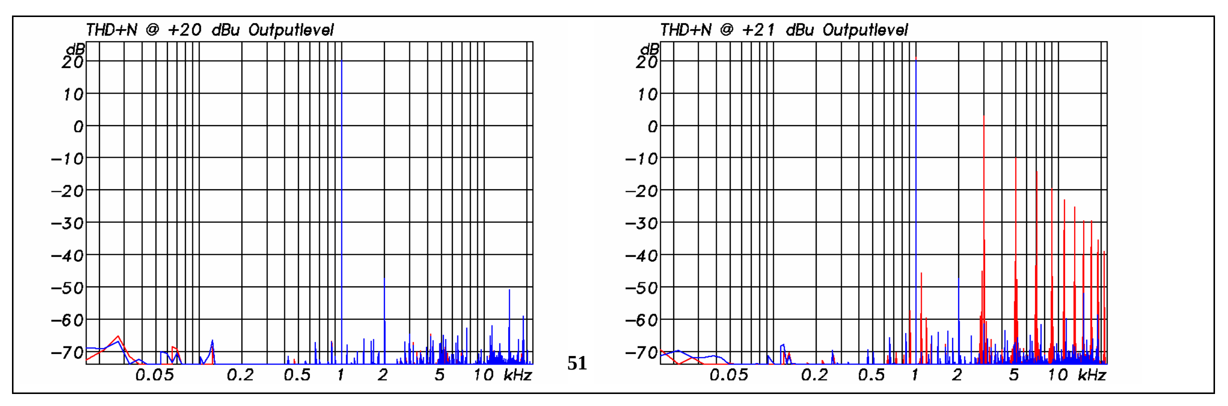


Abbildung 67 Klirrspektrum eines EQ bei 20 dBu (li) und 21 dBu (re) Outputlevel

Herkömmliche Line Ausgänge liefern meist maximale Pegel von 20..26 dBu. Bei der Messung ist unbedingt darauf zu achten, daß nicht der AD-Umsetzer des Meßsystems übersteuert wird, was sich am einfachsten durch die Autorange Funktion vermeiden läßt. Ebenso sollte bedacht werden, daß ein plötzlicher Verzerrungsanstieg nicht nur durch das Erreichen der Clipgrenzen der Ausgangsstufe begründet sein muß. Abhängig vom Pegelniveau innerhalb der einzelnen Stufen des zu messenden Gerätes, können auch hier schon bei kleineren Pegeln Übersteuerungen auftreten. Grundsätzlich empfiehlt sich die

Vorgehensweise, daß am Testgerät zunächst die gewünschte Betriebsart eingestellt wird und in dieser Einstellung dann sowohl der Störpegel am Ausgang wie auch der maximale Ausgangspegel gemessen werden. Zwischen diesen beiden Werten liegt der nutzbare Dynamikbereich. Für das Beispielgerät errechnet sich der Dynamikumfang zu:

20 dBu –(-81,5 dBu) = **101,5 dB** ohne Bewertung 20 Hz- 20 kHz 16K FFT

20 dBu –(-83,4 dBu) = **103,4 dB** mit A-Bewertung 20 Hz- 20 kHz 16K FFT

8.12 Messungen an Endstufen

Befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung.

8.13 Raumimpulsantworten messen und bewerten

Die Grundlage für die raumakustischen Parameter findet sich in der Raumimpulsantwort. Aus der Raumimpulsantwort können alle hier verfügbaren Parameter, wie Nachhallzeit, Deutlichkeit, Klarheitsmaß, Schwerpunktzeit, Rasti etc. berechnet werden. Es gilt daher zunächst, diese Raumimpulsantwort sicher zu messen, was sich bei nähere Betrachtung als nicht ganz unkritisches Unterfangen herausstellt. Im Idealfall wäre dafür eine alle Frequenzen gleichmäßig abstrahlende Punktschallquelle, also mit kugelförmiger Richtcharakteristik, notwendig. Da es eine solche Quelle nicht gibt, muß zu mehr oder weniger mit Kompromissen behafteten Lösungen gegriffen werden. Die einfachste Methode dürfte eine Schreckschußpistole oder eine andere Knallquelle sein, die im Raum abgefeuert wird, während das Signal direkt vom Meßsystem aufgezeichnet wird.

Der Menupunkt *AD only* unter *AD/DA* kann hier als Recorder verwendet werden. Die Aufnahmezeit hängt von der Größe des RAMs im Rechner ab und dürfte bei modernen Systemen immer ausreichend lang sein. Alternativ kann auch ein DAT Recorder zur Aufnahme verwendet werden, von dem das Signal dann später in den Rechner überspielt wird. In beiden Fällen ist es sehr wichtig darauf zu achten, daß das Aufnahmesystem nicht übersteuert wird.

8.13.1 Messung mit Lautsprechern

Weniger kritisch ist dagegen die Messung mit einem Lautsprecher, wo zur Anregung ein Rauschsignal oder ein Sweep verwendet werden kann, die eine gleichmäßige Energieverteilung über einen längere Zeitraum besitzen, so daß problemlos eine gute Aussteuerung möglich wird. Wichtig ist dabei zum einen natürlich auch wieder Übersteuerungen sicher zu vermeiden und zum anderen einen hinreichenden Störabstand zum Grundgeräuschpegel der Umgebung zu erzielen. Der zentrale Problempunkt bei der Messung mit Lautsprecher ist das Richtverhalten. Jegliche Art eines Lautsprechers ist leider weit vom Ideal einer Punktschallquelle entfernt. Einige speziell für diesen Zweck konstruierte Dodecaeder Lautsprecher erreichen bestenfalls bis zur 2 kHz Oktave noch ein mehr oder weniger kugelförmiges Abstrahlverhalten; darüber hinaus beginnen auch diese Systeme eine Vielzahl von Richtkeulen abzustrahlen, die zu unterschiedlichen Anregungen des Raumes in verschiedenen Richtungen führen. Sehr kleine Dodecaeder stoßen dann bei ihrer Pegelfestigkeit für tiefere Frequenzen sehr schnell an ihre Grenzen. Der zur Zeit beste Kompromiß dürfte es daher sein, mit 2-3 unterschiedlichen großen Dodecaedern getrennte Messungen für den tief-, mittel- und hochfrequenten Bereich zu machen, womit es dann möglich sein sollte, den Bereich von der 125 Hz bis zur 4 kHz Oktave abzudecken. Meist wird jedoch auf ganz normale Lautsprecher zugegriffen

werden müssen, wobei man dann die Ergebnisse entsprechend kritisch begutachten und möglichst eine ganze Reihe von Messungen mit verschiedenen Ausrichtungen des Lautsprechers machen sollte. Das verwendete Mikrophon sollte natürlich auch eine Kugelcharakteristik aufweisen.

8.13.2 Meßmenu

Die eigentliche Messung der Impulsantwort mit MF kann in bekannter Form mit einer Frequenzgangmessung aus dem *AD/DA* Menu erfolgen. Der kleine Umweg über den Frequenzbereich wird immer dann erforderlich, wenn eine Kompensationsdatei verwendet wird. Wird zur Anregung ein irgendwie gefärbtes Rauschsignal benutzt, so ist auch hier vorher eine Referenzmessung zu machen, welche die Übertragungsfunktion der gesamten Meßstrecke erfaßt und später aus der Messung herausrechnet, so daß ausschließlich das Verhalten des eigentlichen Meßobjektes übrig bleibt. Der einfachste Weg dürfte damit über die bekannte Lautsprecher Messfunktion *LS sensitivity* gehen. In der Einstellung *Build imp. resp. = post comp* und *Delay shift = no* liefert diese Funktion die komplett kompensierte Impulsantwort. Als Anregungssignale können alle Varianten von Rauschfolgen und Sweepsignalen benutzt werden. Zu beachten ist lediglich, daß die Länge entsprechend der zur erwartenden Nachhallzeit gewählt wird. Eine Rauschfolge vom Grad 16 z.B. ergibt bei einer Abtastrate von 44,1 kHz eine Impulsantwortlänge von $2^{16}/44100=1{,}48$ Sekunden. Reicht die Länge nicht aus, so sollte immer die Anzahl der Samples erhöht und niemals die Abtastrate reduziert werden, da ansonsten keine Kompatibilität mehr zum 44,1 kHz Standard besteht. Das Vorgehen entspricht im Detail damit einer Lautsprechermessung, wie sie bereits in 8.3 erläutert wurde. Ebenso kann hier auch die Mikrokompensation benutzt werden, soweit eine Meßdatei des Mikrophons vorliegt. Ein Fenster darf im Gegensatz zu einer Lautsprechermessung natürlich nicht eingeschaltet werden, da man hier ja die Raumreflexionen unbedingt sehen möchte und nicht als störende Element ausblenden.

8.13.3 Referenzmessung

Eine weitere zu diskutierende Frage ist diejenige, was bei der Referenzmessung in die Meßschleife mit einbezogen wird. Noch einmal vom Idealfall eines Lautsprechers mit dem Verhalten einer Punktschallquelle und eines Mikrophons mit Kugelcharakteristik ausgehend, wäre so vorzugehen, daß die Anordnung Lautsprecher und Mikrophon in reflexionsfreier Umgebung mit in die Referenzmessung einbezogen wird. Sodann wäre die gesamte Meßschleife mit wirklich allen Komponenten einschließlich der Lautsprecher und Mikrophonfrequenzgänge erfaßt. Raumeinflüsse gäbe es aus der reflexionsfreien Umgebung zunächst keine. Sodann würde dieser Aufbau im zu messenden Raum

installiert und hier erneut gemessen. Das Resultat aus der vorherigen Messung in reflexionsfreier Umgebung würde dabei als Referenzmessung dienen. Die einzige Änderung in der Meßschleife wäre damit der Raum. Mit diesem Verfahren könnte also die Raumübertragungsfunktion respektive Impulsantwort perfekt gemessen werden. Der einzige Schwachpunkt in dieser Konstruktion bleibt das vorab schon angesprochene Richtverhalten des Lautsprechers. Auf eine Kompensation des Lautsprecherfrequenzganges sollte nach Möglichkeit nicht verzichtet werden, da die Einflüsse von Fall zu Fall recht erheblich sein können. Ist eine Referenzmessung mit Lautsprecher und Mikrophon in reflexionsfreier Umgebung vorab nicht möglich, kann natürlich auch eine Referenzmessung in der einfachen Form nur für das Meßsystem gemacht werden. Eine spätere Messung der Lautsprecherübertragungsfunktion kann jederzeit noch problemlos zur weiteren Bearbeitung der Messungen verwendet werden.

8.13.4 Raumimpulsantwort

Ist es nun wie auch immer gelungen, die Raumimpulsantwort zu messen, so sollte diese zunächst auf einen hinreichenden Störabstand hin begutachtet werden. Abbildung 68 zeigt ein Beispiel, wo allerdings auch nur mit einem normalen Lautsprechersystem gemessen wurde. Die folgenden Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen diese Impulsantwort in der Leistungsdarstellung und als integrierte Impulsantwort.

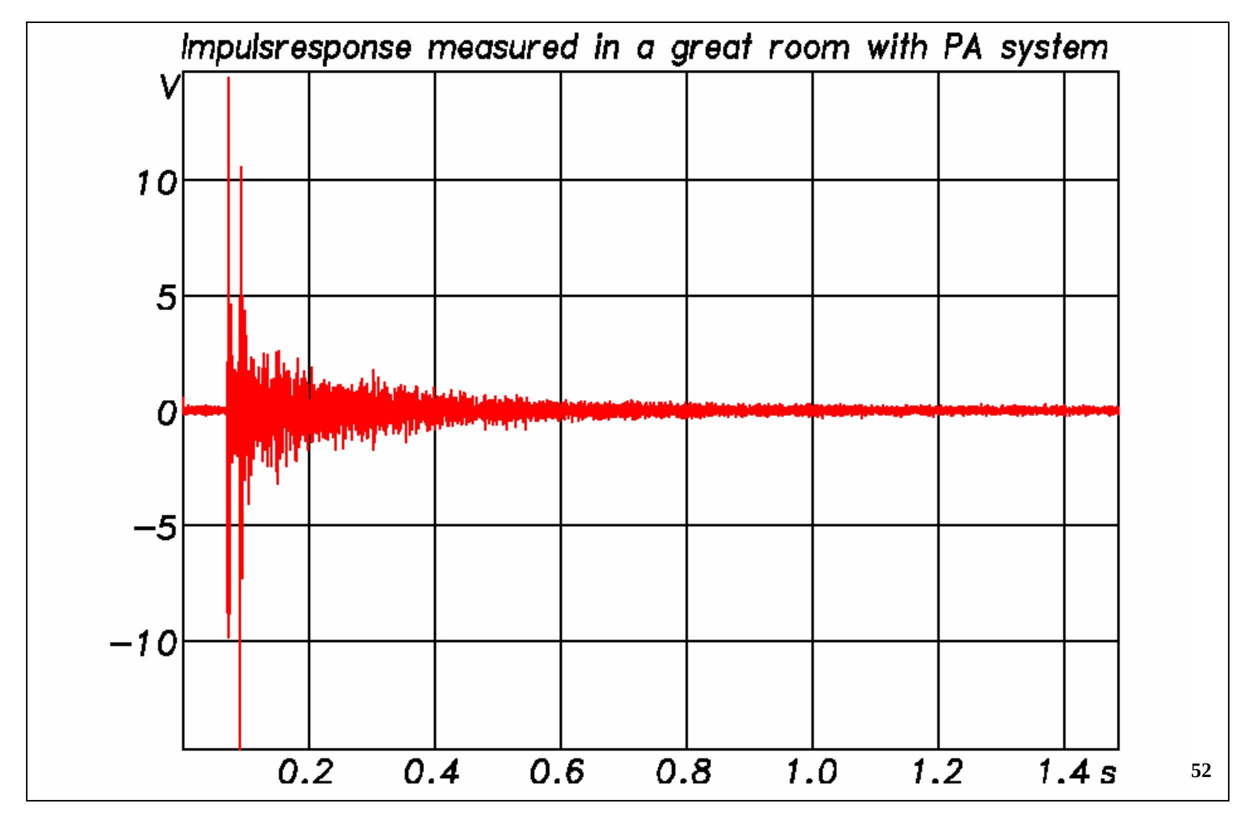


Abbildung 68 Beispiel für eine Raumimpulsantwort als Zeitsignal (Ctrl T)

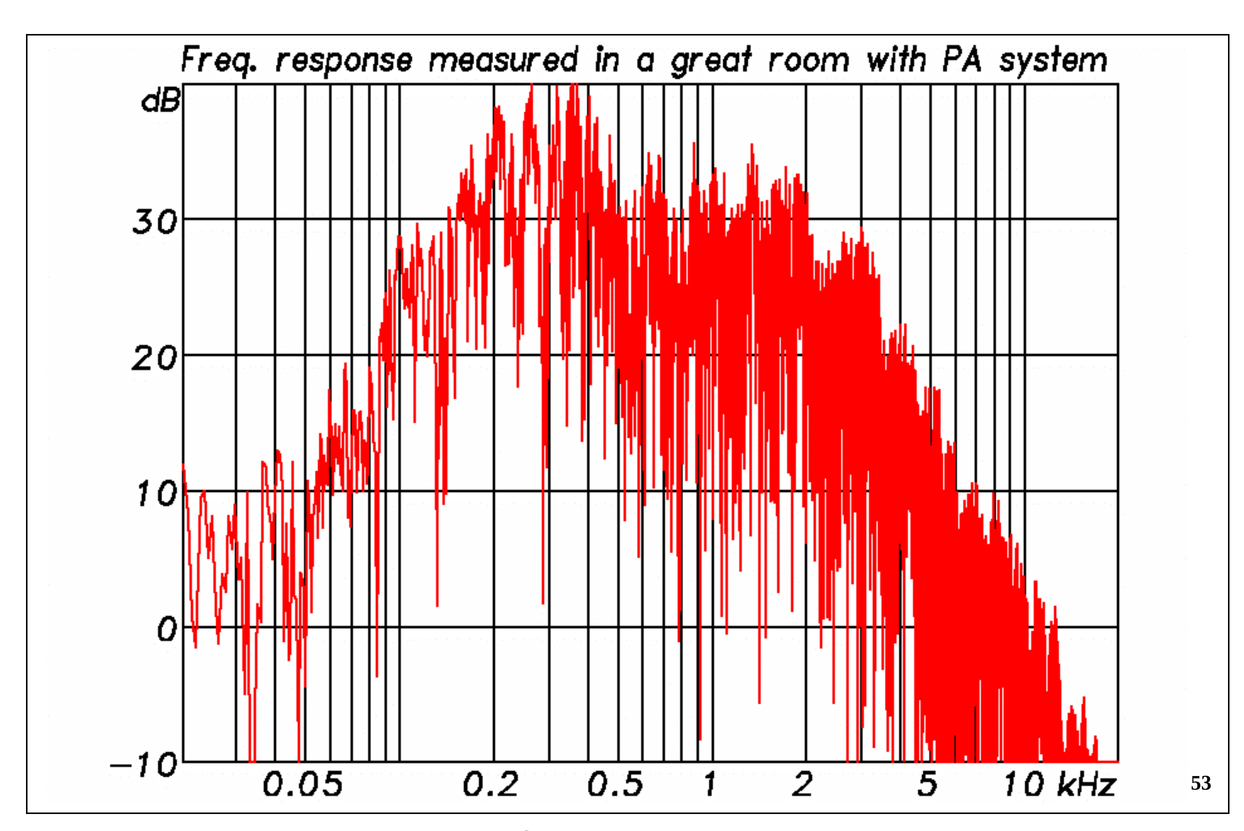


Abbildung 69 Raumübertragungsfunktion im Frequenzbereich

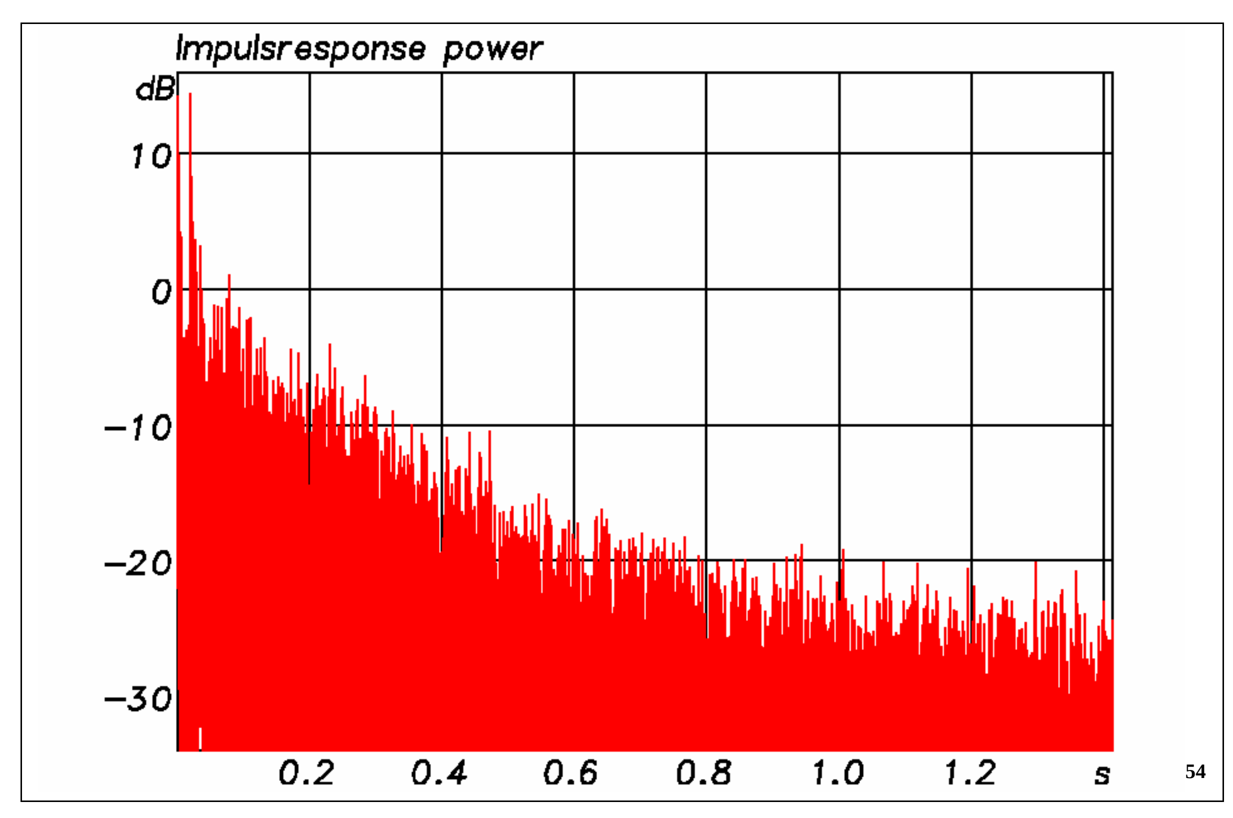


Abbildung 70 Impulsantwort in der Leistungsdarstellung (Ctrl E)

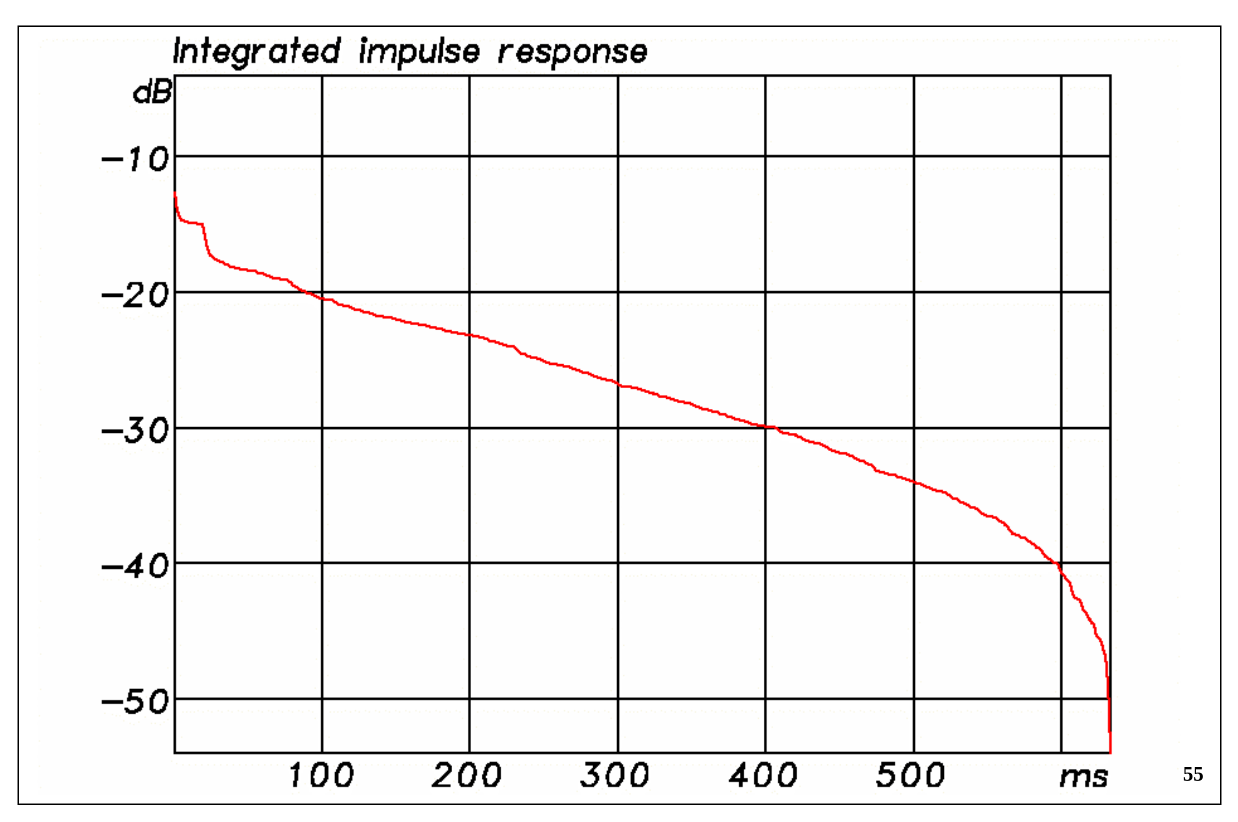


Abbildung 71 Integrierte Raumimpulsantwort (Ctrl N)

8.13.5 Auswertung

Ist das dargestellte Zeitsignal eine Raumimpulsantwort (siehe Abbildung 68), so lassen sich über das `Info` Menu unter `Room Acoustics` die drei Größen Deutlichkeitsgrad D, Klarheitsmaß C und Schwerpunktzeit ts bestimmen. Die für die Ermittlung der raumakustischen Parameter verwendeten Berechnungsgrundlagen wurden der ISO 3382 entnommen. Zum besseren Verständnis und zur Überprüfung der Korrektheit des Verfahrens seien hier die zugrundeliegenden Definitionen für die Deutlichkeit (Definition), das Klarheitsmaß (Clarity) und die Schwerpunktszeit (Center-time) genannt:

$$D = \frac{\int_0^{50\,ms} s^2(t) - n^2 dt}{\int_0^{\infty} s^2(t) - n^2 dt} \bullet 100\% \qquad C = 10\lg \frac{\int_0^{80\,ms} s^2(t) - n^2 dt}{\int_{80}^{\infty} s^2(t) - n^2 dt} \mathrm{dB} \qquad ts = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot \left(s^2(t) - n^2\right) dt}{\int_0^{\infty} s^2(t) - n^2 dt}$$

Entscheidend für die Richtigkeit dieser 3 Parameter ist allerdings die korrekte Wahl des Startpunktes der Auswertung (t=0), der knapp vor dem Direktschall liegen sollte. Der Endpunkt wiederum sollte so liegen, daß dort der Pegel der ausklingenden Impulsantwort noch deutlich über dem Störpegel liegt. Der Startpunkt läßt sich wahlweise manuell

vorgeben oder automatisch finden. Zur Störunterdrückung läßt sich nun der mittlere Störpegel automatisiert ermitteln und zur Verfeinerung des Ergebnisses nutzen.

Room Acoustics			
Region	**cursor**/fixed		Hier läßt sich wählen, ob der Ausschnitt durch die Position der Cursor im Zeitsignal festgelegt wird oder aber stets einen bestimmten Bereich umfaßt.
Lower Limit	66,6 ms		Eingabe des Startzeitpunktes, wenn "Region" auf "fixed" steht. Der tatsächliche Startzeitpunkt wird allerdings bei aktivierter "Start-Detect"-Option durch eine Suchroutine festgelegt.
Upper Limit	1,48 s		Eingabe des Endzeitpunktes für die Integralbildungen. Sollte er weniger als 80 ms vom Startzeitpunkt entfernt sein, so wird er für die Intergralbildungen intern zwangsweise auf diesen Mindestwert gesetzt. Ist dieser Zeitpunkt im Signal nicht mehr vorhanden, so erscheint die Meldung "keine 80 ms" statt der drei Parameter in der Spalte des entsprechenden Kanals.
Start detect	no/**yes**		Ist dieser Schalter aktiviert, so wird der Startzeitpunkt durch Detektion des Direktschall-Peaks der Impulsantwort bestimmt. In diesem Falle wird zunächst das Maximum der Impulsantwort gesucht. Der Startpunkt liegt dann beim ersten Wert, dessen Pegel sich um weniger als den (eine Zeile tiefer einstellbaren) Schwellwert vom Maximum unterscheidet. Die Impulsbeginnsuche läßt sich im Zeitbereich jederzeit auch mit dem Hotkey `Shift-I` zur visuellen Kontrolle aktivieren.
Threshold	-20 dB		Hier läßt sich der gerade beschriebene Schwellwert für die Start-Detektion vorgeben. Er wird von der ISO 3382 mit -20 dB vorgeschlagen.
Noise detect	no/**yes**		Ist dieser Schalter aktiviert, so wird der ungefähre Wert des Störpegels einer Impulsantwort durch Mittelung der Leistung vom Start des Zeitsignals bis zum Beginn des Integrationsbereiches ermittelt. Da der Beginn des Integrationsbereiches bei automatischer Ermittlung mit "Start-Detect" natürlich schon auf die ersten Ausläufer des ansteigenden Direktschall-Impuls fällt, läßt sich in der Zeile "Start minus" noch ein Zeitoffset angeben, um

Room Acoustics			
			den der Mittelungsbereich verkürzt wird. Voraussetzung für die korrekte automatische Ermittlung ist natürlich, daß bei der Messung die Meßdauer so groß gewählt wurde, daß die Impulsantwort gegen Ende (und damit auch am Anfang, da sie periodisch ist) tatsächlich im Noisefloor verschwindet. Ist "Noise-Detect" nicht aktiviert, so läßt sich immerhin noch manuell ein Störpegel eingeben. Soll überhaupt keine Korrektur erfolgen, wird dort "0" eingetragen.
Evaluatiom from	head/**tail**		Bei aktiviertem Noise-Detect erfolgt die Mittelung der Leistung des Störanteiles vom Beginn des Zeitsignales bis zum Startpunkt oder über ein Teilstück mit der unter Length einzustellenden Länge vom Ende des Zeitsignales
Length	10%		Das vom Ende des Zeitsignales verwendete Teilstück in % der Länge zum gesamten Zeitsignal
upto start minus			Bei aktiviertem Noise-Detect erfolgt die Mittelung der Leistung von 0 s bis zum Startpunkt der Integration *minus* dem hier einstellbaren Offset in [s]. Durch den Offset läßt sich vermeiden, daß die ersten Ausläufer der Impulsantwort zum Noise dazugerechnet werden. Würde der Startpunkt der Integration minus diesem Offset bei negativen Zeiten liegen, so wird natürlich überhaupt keine Störpegelermittlung durchgeführt. Am meisten Sinn macht das "Noise-Detect" im Zusammenspiel mit aktiviertem "Start-Detect".
Noisefloor (RMS)			Bei *nicht* aktiviertem Noise-Detect erscheint statt "bis Start minus" dieser Menupunkt, mit dem sich ein fester Wert für die angenommene Störspannung eingeben läßt. Dieser Wert kann z.B. durch Eingrenzen eines für den Störteppich charakteristischen Bereiches mit den Cursor-Tasten und Aufruf der Signalstatistik gefunden werden. Dort steht er in der Zeile "RMS". Soll überhaupt keine Störbefreiung erfolgen, so kann hier einfach eine 0 eingetragen werden. Natürlich können hier auch versehentlich zu große Werte eingesetzt werden, die zu negativen Werten bei

Room Acoustics			
			den Integralbildungen führen können. In diesem Fall wird statt der unbrauchbaren Werte der Schriftzug "ungültig" an der entsprechenden Stelle angezeigt.
Ch0			
Start	71,95 ms	👓	Beginn des Auswertebereiches
Noise floor	70,48 mV	👓	Störpegel
Noise crest	11,9 dB	👓	Crestfaktor des Störpegels
Definition D50	72,8 %	👓	Deutlichkeit
Clarity C80	5,724 dB	👓	Klarheitsmaß
Center Time ts	59,735 ms	👓	Schwerpunktzeit

Tabelle 34 Das Menu `Info Room Acoustics`

8.13.6 Nachhallzeiten

Sinn der integrierten Impulsantwort ist normalerweise, die Nachhallzeit aus einer Raumimpulsantwort zu gewinnen. Dies läßt sich mit Monkey Forest einfach und schnell durchführen: Zunächst wird das gesamte Zeitsignal logarithmisch als Leistung (Abbildung 70) dargestellt (`Strg-E`). In dieser Kurve wir der rechte Cursor auf den Knickpunkt zwischen linearem Abfall und dem horizontal verlaufenden Rauschteppich gestellt (bei ca. 650ms). Der linke Cursor darf am linken Rand verweilen, auch wenn der Impuls später beginnt. Nun kann durch Druck auf `Strg-N` direkt in die integrierte Impulsantwort (Abbildung 71) gewechselt werden, wobei nur der Ausschnitt des Zeitsignals ausgewertet wird, der von den Cursorn in der Leistungskurve umschlossen ist. In der integrierten Impulsantwort lassen sich nun die normgerechten Nachhallzeiten über das *Info* Menu unter *Decay times* abrufen. Die EDT (Early Decay Time) berechnet sich aus dem Teilstück -0,1 bis -10 dB, während die Nachhallzeiten T5 bis T40 jeweils von -5 dB an ermittelt werden. (T5 von -5 bis –10 dB , T40 von -5 bis –45 dB). Zur Steigungsberechnung wird eine lineare Regression innerhalb der integrierten Impulsantwort durchgeführt. Diese legt ein Geradenstück so in das interessierende Intervall, daß die Summe der quadratischen Abweichungen minimal ist. Der unterhalb der Grafik rechts angezeigte Wert der Nachhallzeit bezieht sich auf den Abfall der

Nachhallkurve zwischen beiden Cursorn. Die Nachhallzeit wird aus der Steigung der Geraden ermittelt, die durch einfaches Verbinden der beiden Schnittpunkte zwischen Cursor und integrierter Impulsantwort entsteht. Für die Beispielmessung zeigt das Infofenster folgende Werte:

```
IMP-RAUM.DAT Integrated impulse response

-------- Ch 0 -------

EDT :     1.3 s
T5  :    1.62 s
T10 :    1.79 s
T20 :    1.66 s
T30 :     1.5 s
T40 :     ---
```

Abbildung 72 Infofenster mit Nachhallzeiten aus der Raumimpulsantwort

Eine Zeitsignaldatei kann auch mehrere Impulsantworten enthalten, deren raumakustische Parameter dann unter den einzelnen Kanälen Ch0... angezeigt werden. So bietet es sich z.B. an, in Ch0 die original Impulsantwort abzulegen und in den weiteren Kanälen die mit entsprechenden Frequenzbandfiltern bearbeiteten.

8.13.7 Terz und Oktavfilter

Bisher wurden die Raumimpulsantworten und raumakustischen Parameter breitbandig für den gesamten Hörbereich betrachtet. Manchmal kann aber auch ein begrenzter Frequenzbereich von Interesse sein. Eine typische Anwendungen wäre z.B. die frequenzabhängige Nachhallzeit in Oktavbändern anzugeben. Ebenso könnte man sich den Vergleich gemessener und berechneter Raumimpulsantworten oder ETCs in Oktav- oder Terzbändern vorstellen. Wie dem auch sei, bietet MF mit der Option J-Filter ein sehr komfortables und umfangreiches Filtermenu, daß innerhalb kürzester Zeit alle Filterung im Zeit oder Frequenzbereich ausführt. Die Impulsantwort wird dazu als Zeitsignal geladen und anschließend mit J-Filter bearbeitet. Das `J-Filter` Menu findet sich unter `Edit` und kann sowohl für Zeitsignale, wie auch für Frequenzspektren aufgerufen werden. Näheres zu J-Filter findet sich im Kap. 10.4. An dieser Stelle sollen nur einige exemplarische Einstellungen für eine Terz- und eine Oktavfilterbank erläutert werden. Um zunächst die Filtercharakteristik zu veranschaulichen kann im Frequenzbereich im *Set Mode* das eigentliche Filter angeschaut werden. Mit den folgenden Einstellungen wird ein Filtersatz *(Filterset=multiple)* mit Terzfiltern von 125 Hz bis 8 kHz mit einer Flankensteilheit von 48 dB/Oct. erzeugt.

```
Mode                : set/filt
Phase               : complex/0ø   Domain    : ana/dig
Filter No Pg      :         1    Link all : no/yes
------------------ Characteristics --------------------
Type              : LP/HP/LP+HP/AP/BP/Notch/PEQ/PZ
Shape             : rect/crit/Bess/But/LiRi/Chebyshev
Power               :          1
Degree              :          8
Slope               :     48.165 dB/octave
Attenuate at fc     :     3.0103 dB

Gain                :          0 dB
------------------ Frequency range --------------------
Upper cut off       :          8 kHz <- Copy from cursor
Lower cut off       :        125 Hz
Filterset           : single/multiple
Steps               : lin/log
Bandwidth           : 1 /    3.00 - octave
Reference           :          1 kHz
```

Abbildung 73 J-Filter Setup im Frequenzbereich für Terzfilterbank

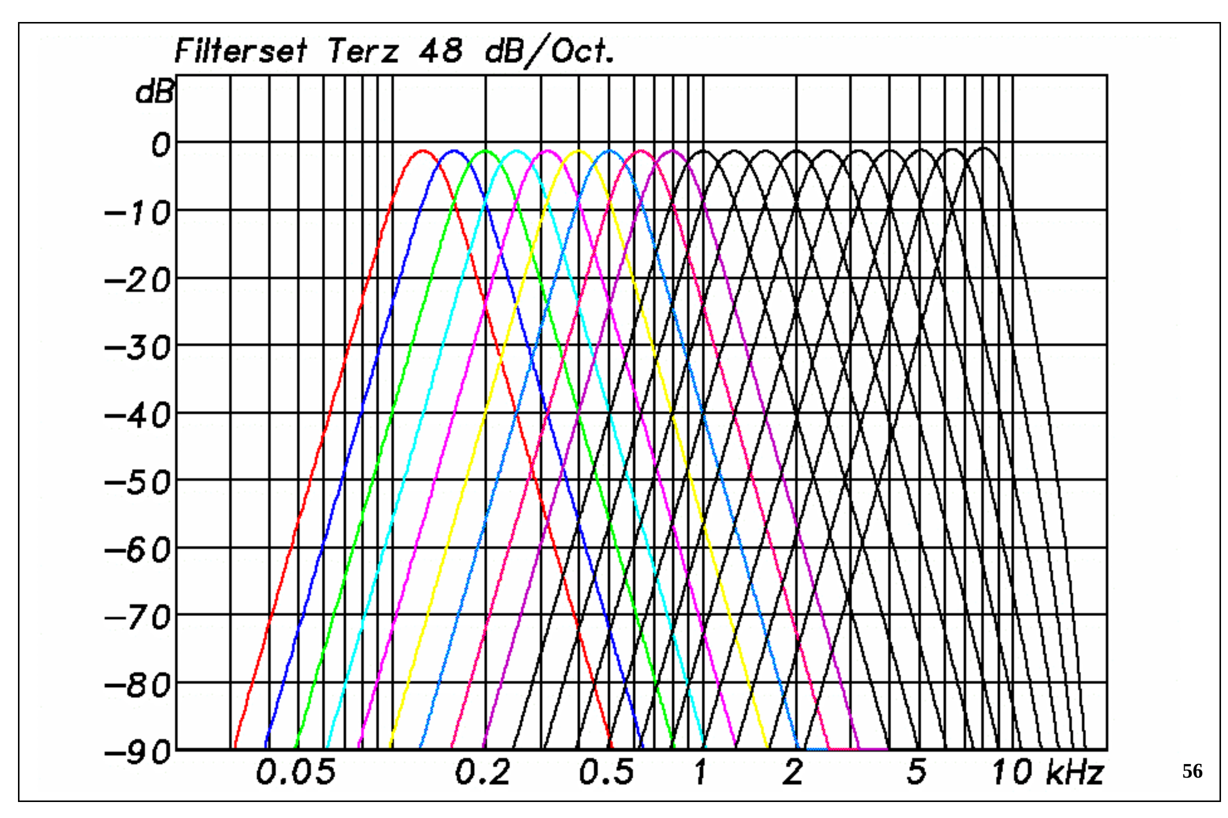


Abbildung 74 Filtersatz in Terzschritten

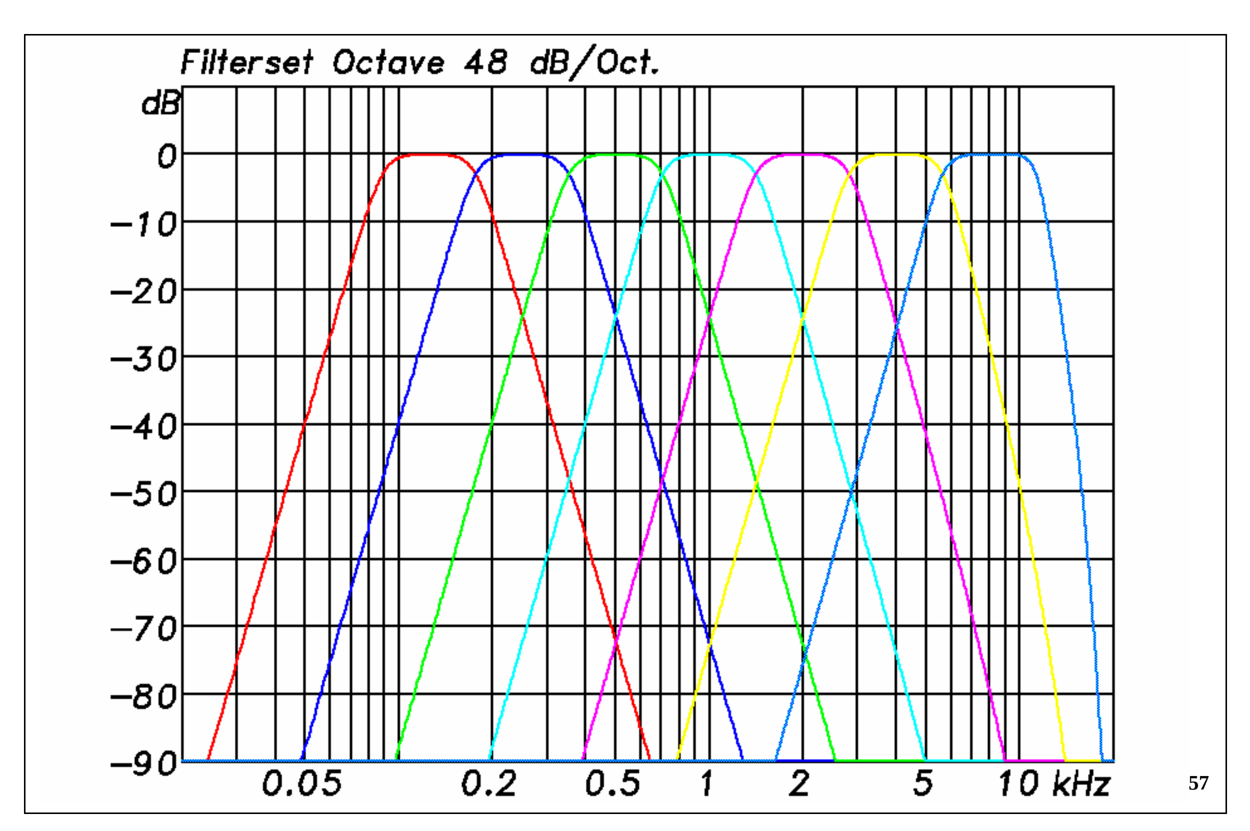


Abbildung 75 Filtersatz in Oktavschritten

Soll eine gegebene Impulsantwort mit diesen Filtern bearbeitet werden, so ist `J-Filter` im Zeitbereich und im *Filt Mode* aufzurufen. Der *Filt Mode* bearbeitet ein bestehendes Signal mit den gewünschten Filtern im Gegensatz zum *Set Mode*, der nur die Impulsantworten bzw. Übertragungsfunktionen der Filter selber erzeugt. Das folgende Fenster zeigt die J-Filter Einstellungen für die Oktavfilterung der Impulsantwort aus Abbildung 68. Nach vollzogener Bearbeitung durch J-Filter befinden sich die gefilterten Signale in den Kanälen 0..6 in der Reihenfolge, daß Ch0 mit dem 125 Hz Filter beginnt und Ch6 mit dem 8 kHz endet. Für die gefilterten Impulsantworten kann jetzt in bekannter Weise, wie auch für die ungefilterte Raumimpulsantwort, die Nachhallzeit bestimmt werden.

```
Mode              : set/filt
Error Feed Back :  no/yes      Reverse  : no/yes
Filter No Pg    :         1    Link all : no/yes
------------------ Characteristics --------------------
Type            : LP/HP/LP+HP/AP/BP/Notch/PEQ/PZ
Shape           : rect/crit/Bess/But/LiRi/Chebyshev
Power             :         1
Degree            :         6
Slope             :    48.165 dB/octave
Attenuate at fc   :    3.0103 dB

Gain              :         0 dB
------------------ Frequency range --------------------
Upper cut off     :         8 kHz
Lower cut off     :       125 Hz
Filterset         : single/multiple
Steps             : lin/log
Bandwidth         : 1 /   1.00 - octave
Reference         :         1 kHz
```

Abbildung 76 J-Filter Setup im Zeitbereich für eine Oktavfilterbank zur Bearbeitung einer Impulsantwort

```
Integrated imp.resp. IMP-OCTA.DAT Ch0 Impulsresponse
with octave filter 125 Hz (Ch0) to 8 kHz (Ch6)

-------- Ch 0 ------ Ch 1 ------ Ch 2 ------ Ch 3 ------ Ch 4 ------ Ch 5 ------ Ch 6 ---
EDT :    1.07 s    892.69 ms     1.21 s      1.43 s      1.36 s    778.89 ms   241.41 ms
T5  :    1.25 s      1.31 s      1.34 s      1.85 s       2.2 s      1.62 s    459.06 ms
T10 :    1.49 s      1.77 s      1.66 s      1.63 s      1.77 s      1.57 s      1.08 s
T20 :    1.36 s      1.48 s      1.33 s      1.33 s      1.32 s      1.19 s    907.85 ms
T30 :    1.14 s      1.32 s      1.15 s      1.29 s      1.24 s      1.06 s    828.44 ms
T40 :     1.1 s      1.27 s      1.08 s       1.2 s      1.19 s      1.03 s    764.36 ms
```

Abbildung 77 Infofenster mit Nachhallzeiten aus der Raumimpulsantwort in Oktavschritten Ch0=125 Hz ; Ch6=8 kHz

Abbildung 77 zeigt das Infofenster mit den Nachhallzeiten, die jetzt aus den insgesamt 7 mit Oktavbandfiltern bearbeiteten Impulsantworten bestimmt wurden. Für eine komplette Darstellung bietet es sich an, die ungefilterte Impulsantwort noch als achten Kanal (Ch7) hinzu zu laden, so daß alle Werte in einem Infofenster betrachtet werden können. Das Infofenster kann mit einem Tastendruck `Ctrl Print` in das MF.PRO File kopiert und von dort aus als Text weiterverarbeitet werden. Der Name der zugehörigen Datei wird im Ausdruck des Infofensters immer vorangestellt, so daß auch Reihenmessungen einfach und übersichtlich dokumentiert werden können.

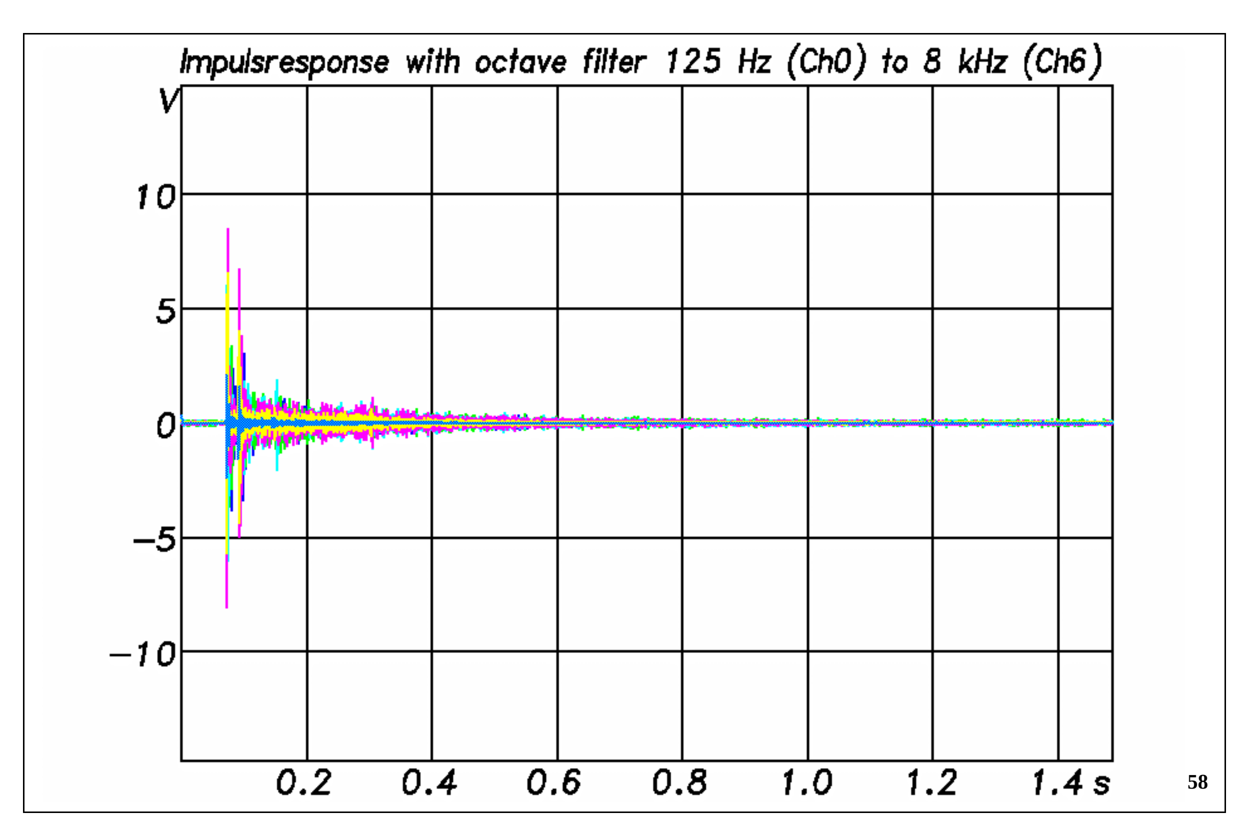


Abbildung 78 Oktavgefilterte Raumimpulsantworten in Ch0 ... Ch6

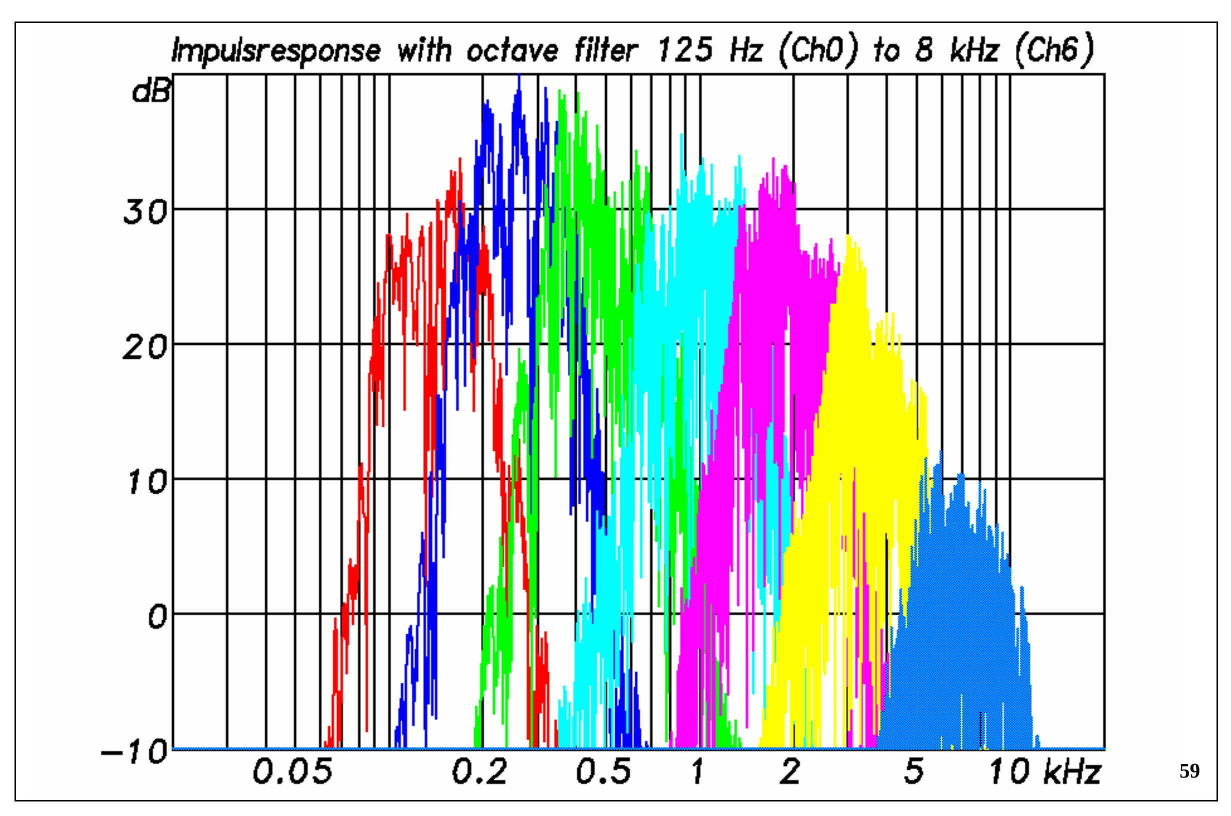


Abbildung 79 Raumübertragungsfunktionen mit Oktavfiltern in Ch0 ... Ch6

8.13.8 ETC bestimmen

Die ETC (Energy Time Curve) stellt eine schnelle Möglichkeit dar eine Übersicht über das zeitliche Verhalten einer Raumimpulsantwort zu bekommen. Über der Zeitachse wird der logarithmierte Betrag der Impulsantwort aufgetragen. Lange nach dem Direktschall eintreffende größere Energieanteile, die als störende Echos empfunden werden können oder ähnliche Effekte, sind hier gut zu beobachten. Ebenso besteht die Möglichkeit eines einfachen Vergleiches mit den von Raumsimulationsprogrammen berechneten ETC Kurven, die hier meist neben einer breitbandigen Darstellung auch in Oktav- oder Terzschritten berechnet werden können.

Sobald die Impulsantwort in MF geladen ist, kann im *Edit* Menu die Funktion *Envelope* aufgerufen werden, die alle Berechnungen ausführt. Danach kann mit der Tastenkombination Shift Y auf eine logarithmische Skalierung umgeschaltet werden. Der Darstellungsbereich wird mit der Funktion *Display range* im *Display* Menu eingestellt.

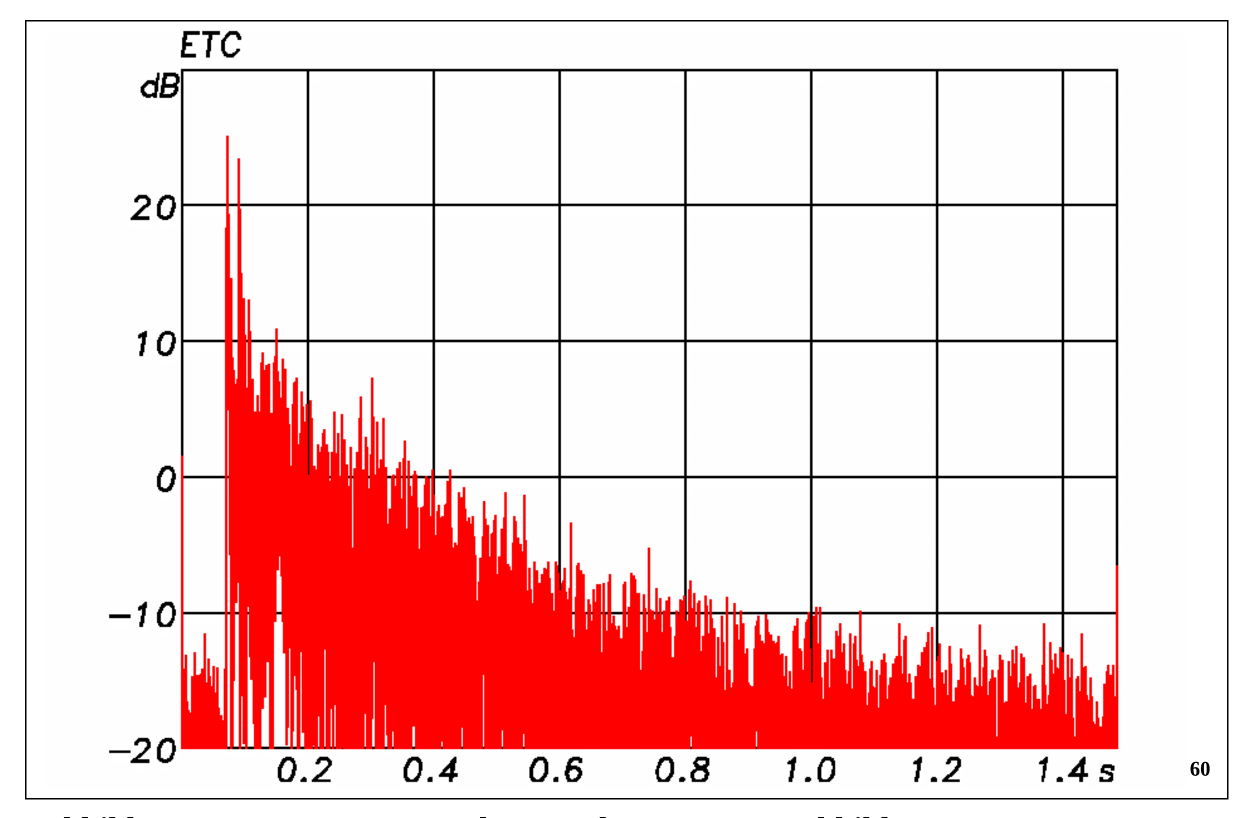


Abbildung 80 ETC Kurve aus der Impulsantwort von Abbildung 68

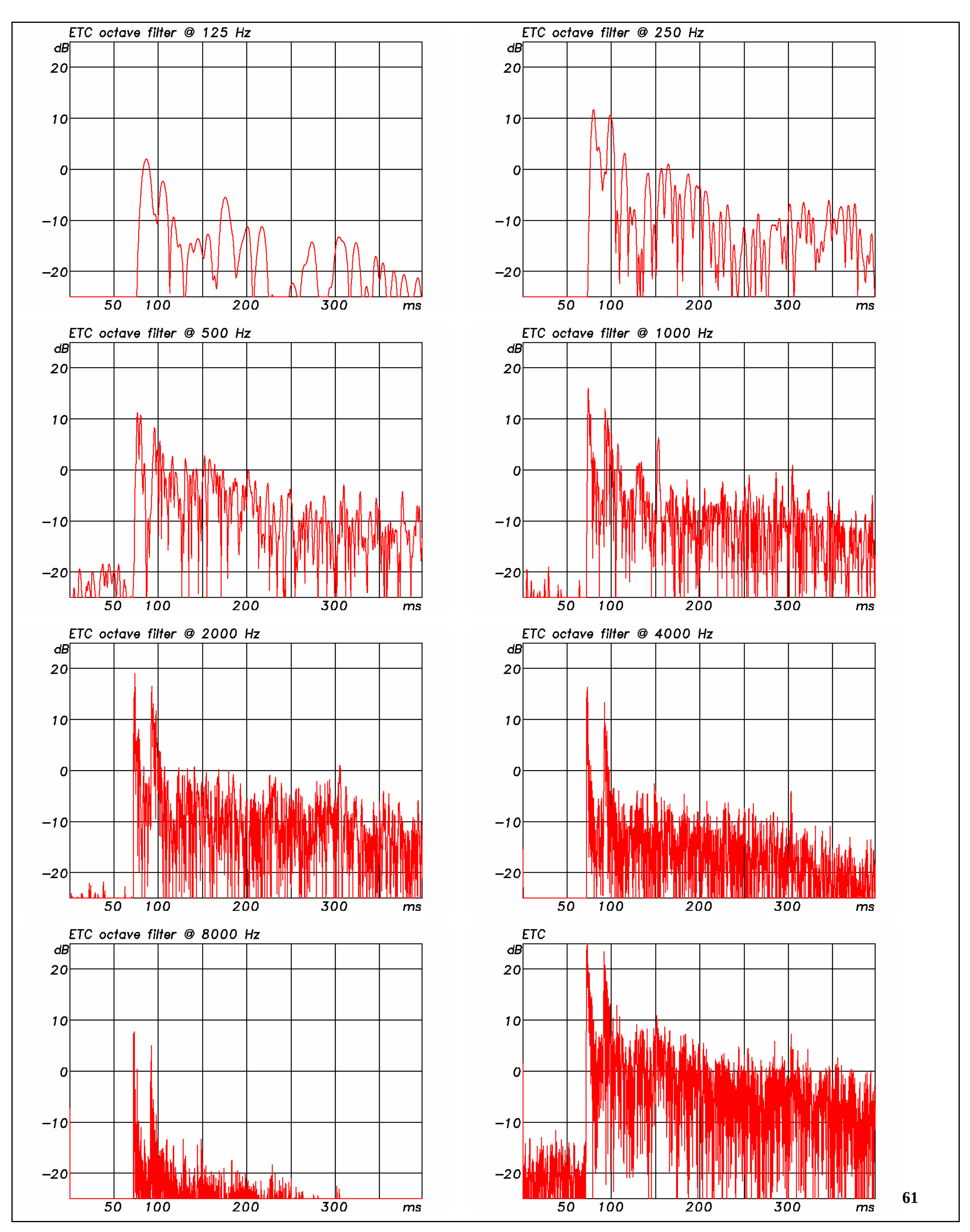


Abbildung 81 ETC Kurven aus der Impulsantwort von Abbildung 68 mit Oktavfiltern (vergrößerte Darstellung der Zeitachse)

8.13.9 STI und RASTI messen

STI (Speech Transmission Index) und RASTI (Rapid STI) stellen beliebte Größen zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit über eine beliebige Übertragungsstrecke von einer Sender- zu einer Empfängerposition dar. Das können z.B. ein Sprecher und ein Zuhörer in einem Raum mit oder ohne Beschallungsanlage sein. Grundlage für die Berechnung des STI ist die Übertragungsfunktion zwischen Sender und Empfänger. Die Übertragungsfunktion ist als komplexes Frequenzspektrum oder als Impulsantwort mit hinreichender Länge zu messen, so daß die Impulsantwort innerhalb des betrachteten Zeitausschnittes völlig abgeklungen ist. In großen Räumen mit langen Nachhallzeiten sollten daher Meßsignale vom Grad 16 bis 18 verwendet werden.

Für den STI Wert wird nun geprüft, wie weit ein frequenzmoduliertes Rauschen bei der Übertragung über die Strecke mit der entsprechenden Impulsantwort an Modulationstiefe verliert. In Anlehnung an die signalstatistischen Parametern von Sprache wurde festgelegt, daß in 7 Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für jeweils 14 Modulationsfrequenzen von 0,63 Hz bis 12,7 Hz in Terzschritten bestimmt wird, wie weit die Modulationstiefe beeinflußt wird. Dieses kann durch Nachhall, Echos, etc. aber auch durch Störgeräusche geschehen. Die Störgeräusche sollen hier aber zunächst nicht weiter betrachtet werden. Anschaulich würde die Messung so ablaufen, daß entsprechende Rauschsignale zunächst über Oktavfiltern für die 7 Frequenzbänder geschickt und anschließend mit der entsprechenden Frequenz moduliert würden. Am Ende der Übertragungsstrecke wäre dann zu prüfen, um welchen Faktor die Modulationstiefe abgenommen hat. Der Wert hängt von der Modulationsfrequenz ab und liegt zwischen 1 (keine Beeinträchtigung der Modulation) und 0 (die Modulation wird völlig verdeckt). Über der Frequenzachse mit der Modulationsfrequenz aufgetragen, ist das die MTF (Modulation Transfer Function), die für die STI Berechnung im Bereich von 0,5 bis 16 Hz von Bedeutung ist. Aus der Impulsantwort kann diese in wenigen Schritten berechnet werden. Die Impulsantwort ist dafür zunächst mit Oktavfiltern für die 7 Frequenzbänder zu filtern. Aus den 7 oktavgefilterten Impulsantworten können nun ebenfalls die 7 MTFs für die betreffenden Frequenzbänder berechnet werden. Für eine hinreichende Auflösung sollte die Impulsantwort mindestens 262144 Werte lang sein oder aber künstlich mit Nullen auf diesen Wert verlängert werden. Die Impulsantwort wird anschließend quadriert, gleichgerichtet und dann in den Frequenzbereich transformiert. Hier erfolgt jetzt eine Normierung auf 1 (=0dB) bei 0 Hz. Schon liegt die MTF vor. Für die STI Berechnung ist dieser Wert dann noch in einen Signal-Störabstand (S/N) umzurechnen und dann der dB-Mittelwert für den Bereich von 0,5 bis 16 Hz abzulesen. Werte die größer als +15 dB oder kleiner als –15 dB sind gelten als Ausreißer und werden auf den Wert von +15 oder –15 dB beschränkt. Für jedes der 7 Frequenzbänder gibt es nun einen

Wert, der dann noch mit Gewichtungsfaktoren versehen und mit den anderen Werten ebenfalls dB-gemittelt wird. Der endgültige Mittelwert liegt damit immer zwischen –15 und +15 dB. Der dB Wertebereich wird abschließend noch in eine Größe zwischen 0 und 1 umgerechnet, was dann der lang ersehnte STI Wert ist. Näheres dazu findet sich in der einschlägigen Literatur zum STI und RASTI. Ein Beispiel soll die Vorgehensweise in einzelnen Schritten erläutert, wenngleich MF den Wert auch direkt in einem Arbeitsvorgang berechnen und anzeigen kann.

Noch eine abschließende Erklärung zum RASTI, der lediglich eine vereinfachte Varianten des STI mit nur zwei Frequenzbändern bei 500 Hz und 2 kHz mit 4 bzw. 5 Modulationsfrequenzen darstellt. Über die insgesamt 9 Werte wird dann gleichmäßig ohne Gewichtungsfaktoren gemittelt, um den RASTI Wert zu bestimmen.

Für das Beispiel soll die schon bekannte Raumübertragungsfunktion dienen, die mit Unterstützung durch eine Beschallungsanlage vom Sprecherplatz zu einem Zuhörerplatz im Auditorium gemessen wurde. Die folgende Abbildung zeigt die breitbandige Impulsantwort der Übertragungsstrecke. Die Übertragung wird durch die links und rechts an der Bühne installierten Lautsprechersysteme dominiert. Direktschallanteile vom Sprecherplatz kommen im Auditorium nur zu einem sehr geringen Anteil an. Der Zuhörerplatz war nicht mittig zur Bühne gewählt, so daß die Anteile von den beiden Lautsprechern mit zeitlichen Versatz eintreffen.

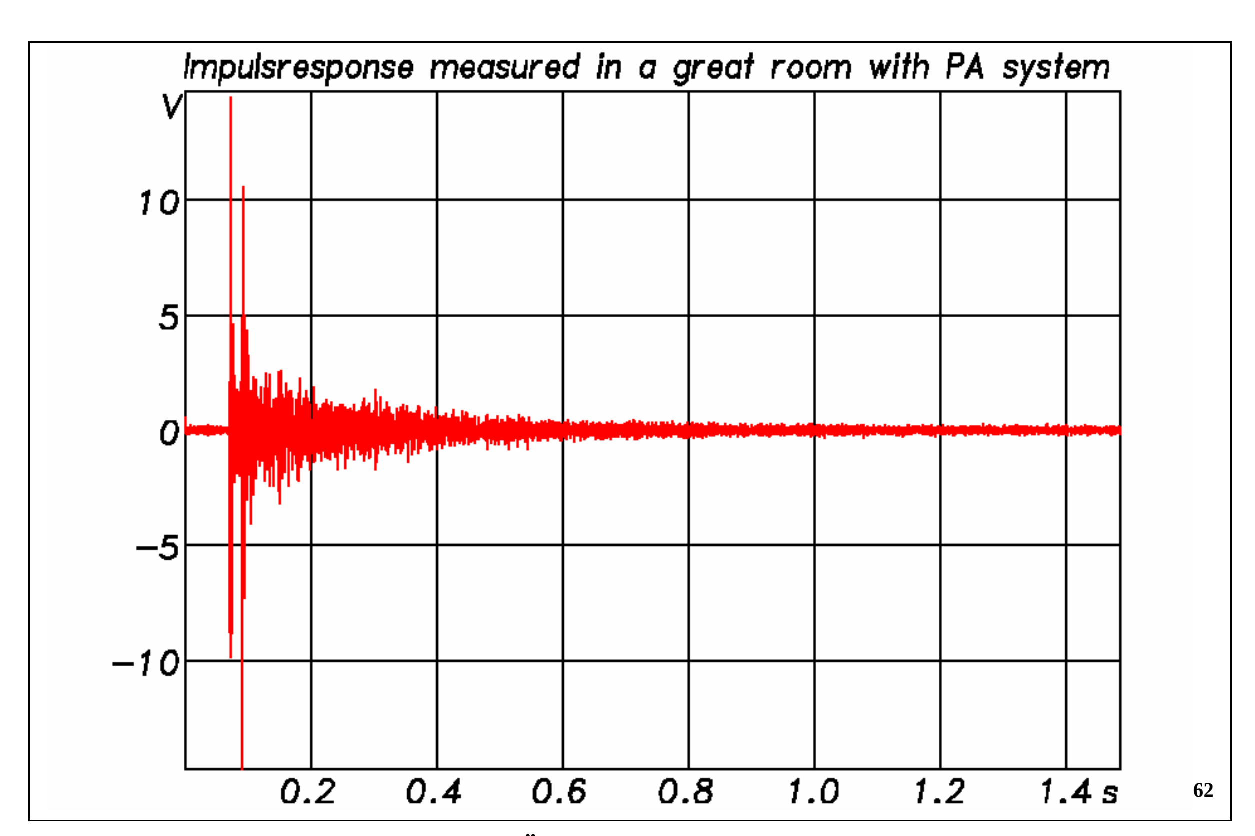


Abbildung 82 Impulsantwort der Übertragungsstrecke im Raum mit Lautsprecheranlage

Sobald die Impulsantwort in MF geladen ist und beide Cursor an den Rändern stehen (`Shift E`) kann mit J-Filter die Oktavfilterung in 7 Bändern vorgenommen werden. Die Einstellungen entsprechen denen in Abbildung 76. Die Filtereinstellung für das multiple Filterset muß LP+HP mit Butterwoth 6.Ordnung von 125 Hz bis 8 kHz sein. Nach einer kurzen Berechnungszeit liegen nun die gefilterten Impulsantworten in den Kanälen 0 bis 6 vor. Ch0 entspricht der 125 Hz Oktave Ch6 der 8 kHz Oktave. Zur Sicherheit sollte die 7-kanalige Datei jetzt erst einmal abgespeichert werden. Die folgende Abbildung zeigt die 7 gefilterten Impuslantworten übereinander dargestellt.

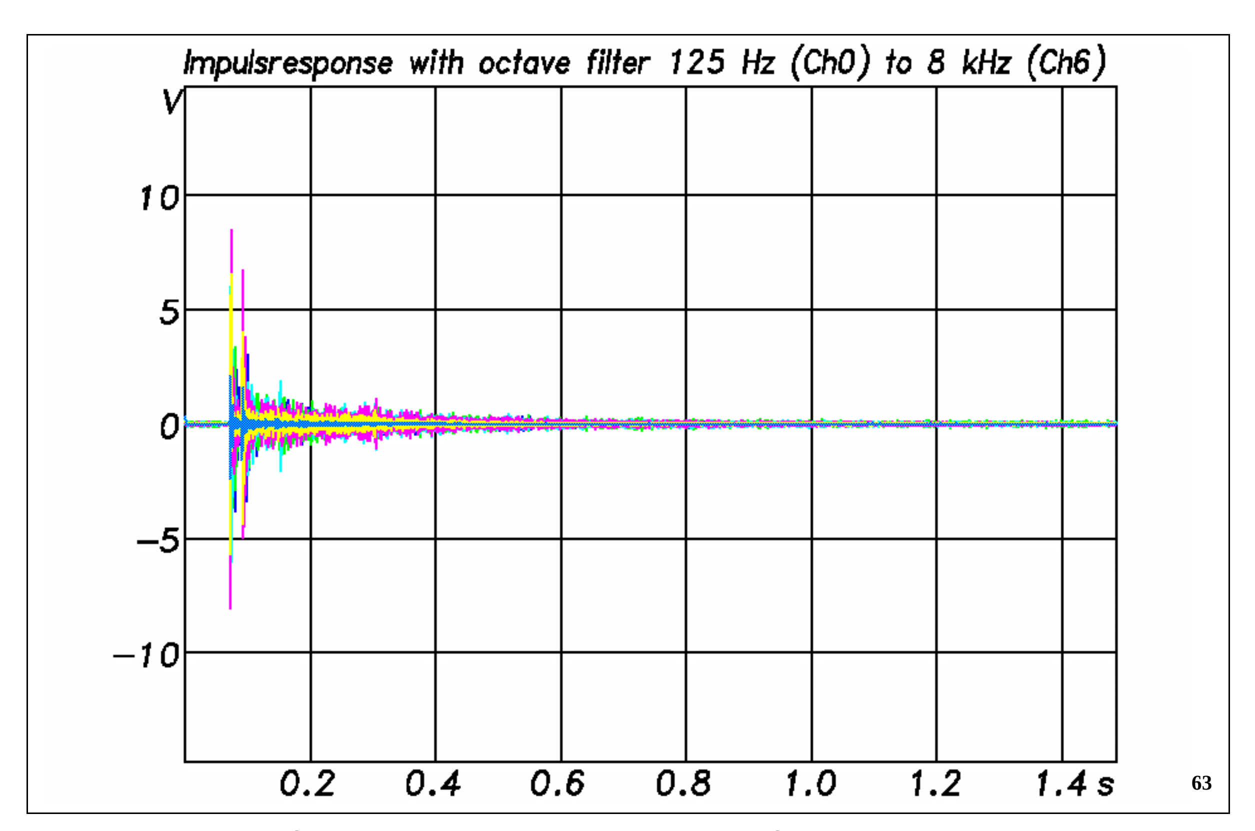


Abbildung 83 Gefilterte Impulsantworten mit Oktavfiltern

Im nächsten Schritt sind die Impulsantworten auf 262144 (265K) Werte zu verlängern, wenn sie nicht ohnehin schon diese Länge haben. Dazu wird der rechte Cursor aktiviert (Taste R) und anschließend im `Edit` Menu die Funktion `Extend` aufgerufen. Die Einstellung lautet hier: *Extend to length 262144 with 0*. Die Impulsantworten sind danach 5,94 s lang.

Zur Berechnung der MTF aus der Impulsantwort ist diese jetzt zunächst zu quadrieren mit der Funktion `Raise to the power` im `Edit` Menu. Der Wert für Power lautet jetzt natürlich 2. Die Option *All channels* ist auf *yes* zu schalten, damit alle 7 Impulsantworten quadriert werden. Da bei MF die negativen Werte auch nach dem Quadrieren noch negativ bleiben, muß ein weiterer Schritt für die Betragsbildung eingelegt werden. Dieser findet sich im `Edit` Menu unter `Rectify`. Auch hier darf die Option *All channels = yes* nicht vergessen werden. Das Resultat für die Beispielfunktion ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

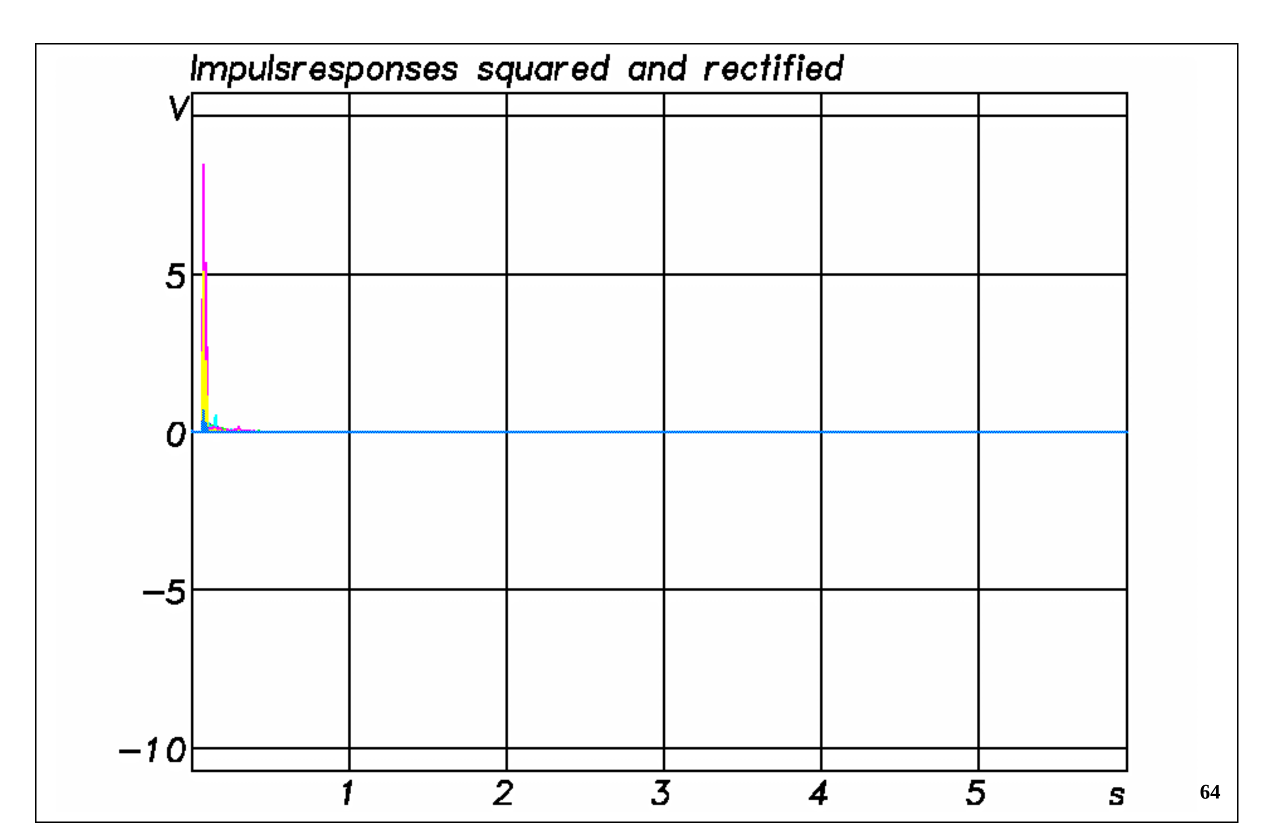


Abbildung 84 Quadrierte und gleichgerichtete Impulsanworten

Die soweit behandelten Impulsantworten sind jetzt mit ihrer kompletten Länge in den Frequenzbereich zu transformieren (`Shift E und F`). Die Bearbeitung von 7 FFTs mit je 256K Werte nimmt einen kurzen Augenblick in Anspruch. Das Resultat ist jetzt noch für alle 7 Kurven im Frequenzbereich so zu normieren, daß der Wert für 0 Hz = 1 (0 dB) ist. Dazu wird der linke Cursor an den äußersten linken Rand bei 0 Hz plaziert (`Shift E und L`) und anschließend die *`Normalize`* Funktion aus dem *`Edit`* Menu aufgerufen. Die Einstellungen hier lauten *New magnitude = 1V* ; *All same level = yes* und *All channels = yes*. Danach sollten alle Spektren bei 0 Hz auf den Wert 1 (=0dB) normiert sein. Was man jetzt sieht sind die MTFs (siehe Abbildung 85). Interessant ist aber nur der Bereich von 0 bis ca. 20 Hz, womit sich die Datenmenge erheblich reduzieren läßt. Der linke Cursor bleibt bei 0 Hz und der rechte wird auf ca. 20 Hz plaziert. Dieser Teilbereich wird dann als neue Datei mit der *`Write Block`* Funktion aus dem *`Edit`* Menu abgespeichert. Auch hier ist auf die Einstellung *All channels = yes* zu achten. Die weiteren Einstellungen lauten *Format=ITA/4 byte* und *Region=cursor*.

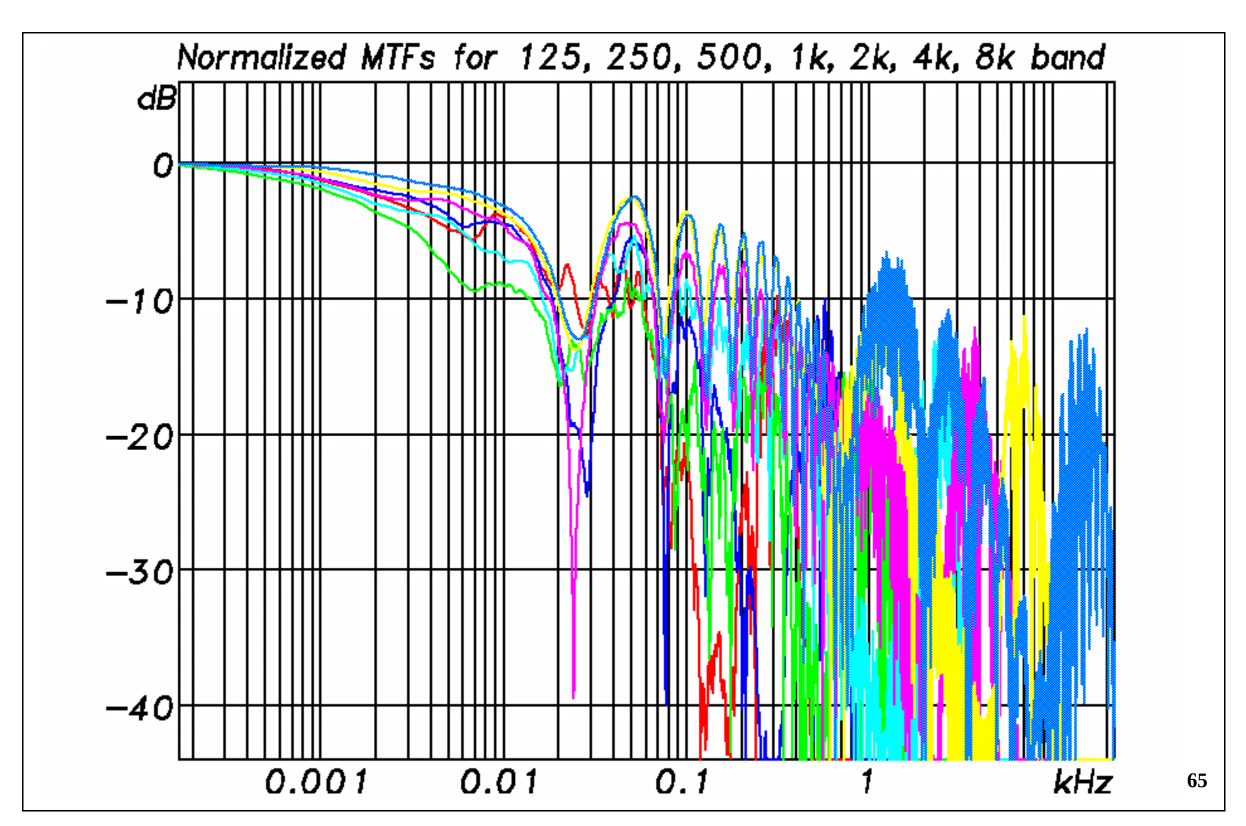


Abbildung 85 Komplette Modulation Transfer Functions auf den Wert 1 bei 0 Hz normiert

Die Datei ist jetzt auf den Bereich bis 20 Hz reduziert und läßt eine schnelle weitere Auswertung zu. Zusätzlich sollte noch die Phase für alle Kanäle zu Null gesetzt werden. Das heißt wiederum, zuerst die Cursor an den Rändern des Spektrums plazieren (`Shift E`) und dann die Funktion *`Phase`* aus dem *`Edit`* Menu aufrufen. Die Einstellungen *Mode=set* ; *Phase=0°* und *All channels=yes* erfüllt diesen Wunsch umgehend. Anschließend ist die Datei erneut abzuspeichern. Mit einer linearen Skalierung für die y-Achse (`Shift Y`) erscheint dann die Darstellung aus der folgenden Abbildung, in der die MTF Werte mit einem Wertebereich von 0..1 abgebildet sind.

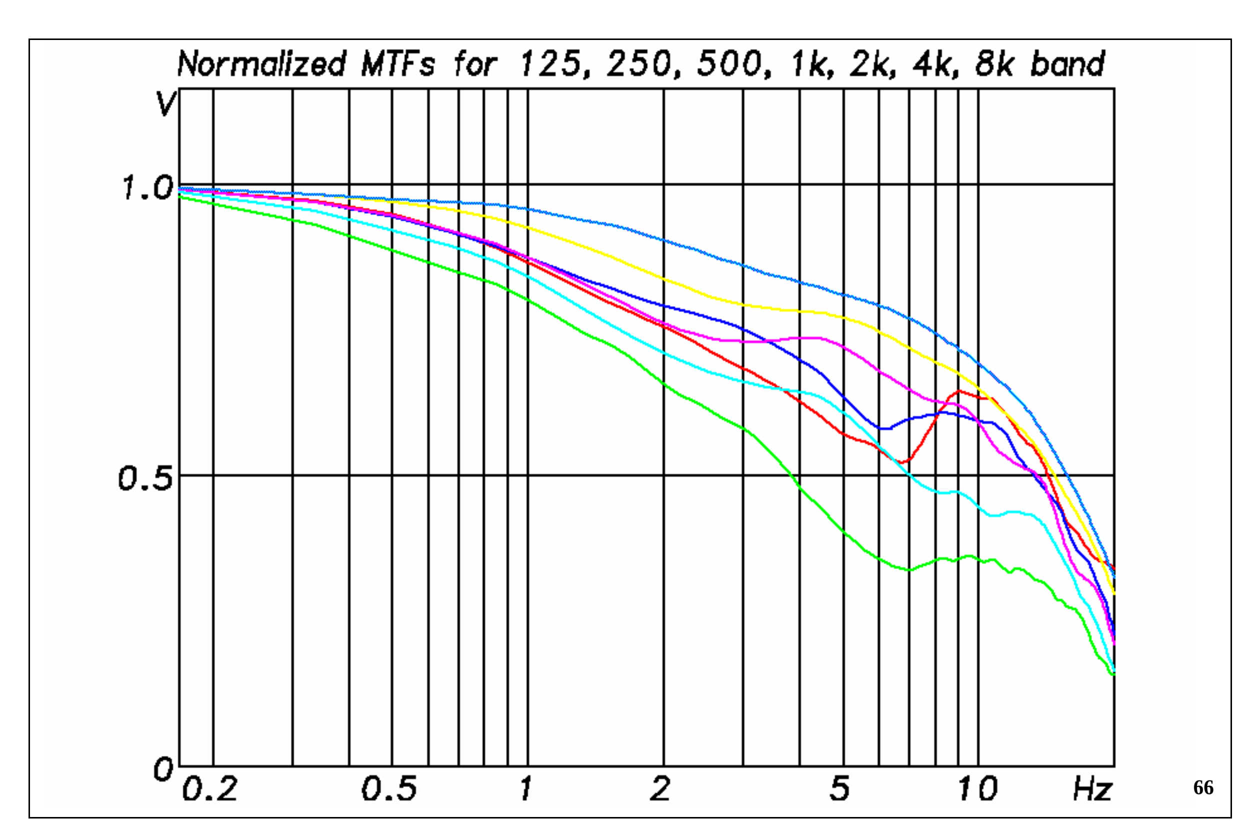


Abbildung 86 MTF für die 7 Oktavbänder im Bereich bis 20 Hz

Im nächsten Schritt sind die MTF m(f) Werte in S/N Werte umzurechnen. Die Gleichung dazu ist recht einfach und lautet:

S/N = 10 log (m/1-m) dB

Auch diese kleine Rechnerei kann mit den Funktion aus dem Edit Menu schnell ausgeführt werden. Zunächst sind alle Werte mit einem negativen Vorzeichen zu versehen. Das geht über die `Negate` Funktion. In der Darstellung des Betrages ändert sich dabei natürlich nichts. Lediglich die Phase sollte jetzt überall –180° sein. Im nächsten Schritt wird ein Wert von 1 addiert mit der Funktion `Add` (*Magnitude=1 ; Phase=0°*).

Es gilt weiterhin, daß alle Funktionen sich immer auf alle Kanäle und den gesamten Bereich von 0 bis 20 Hz beziehen. Die beiden Cursor müssen daher immer ganz außen stehen und die Option *All Channels* muß immer auf *yes* geschaltet sein. Das Ergebnis (1-m(f)) kann dann erst einmal in einer temporären Datei abgespeichert werden. Anschließend kann die Ursprungsdatei mit der Funktion m(f) erneut geladen und durch die Temporärdatei (1-m(f)) dividiert werden. Über die Funktion `Read Block` mit Mode=div werden automatisch alle 7 Kanäle der ursprünglichen Datei durch die entsprechenden 7 Kanäle der über `Read Block` nachgeladenen Datei dividiert.

Mit der `Shift Y` Taste kann nun auf die logarithmische Darstellung mit dB-Werten umgeschaltet werden. Diese Werte entsprechen aber leider immer noch nicht so ganz den gewünschten Werten, da hier die dB-Werte sich nicht auf Leistungen beziehen und damit nicht mit 10 log sondern mit 20 log berechnet sind. Auch dieses letzten Hindernis läßt sich aber mit MF und seinem *Edit* Menu leicht aus dem Weg räumen. Mit der Funktion *Stretch/squeeze* und einem *Factor=0.5* bei einer *Reference=1* wird die Darstellung auf 10 log neu skaliert.

Über die *Spectral statistics* Funktion im *Info* Menu können jetzt die mittleren dB-Werte für den STI relevanten Bereich von 0,5 Hz (=*Lower Limit*) bis 16 Hz (=*Upper Limit*) abgelesen werden. Die Einstellung *Region* ist dabei auf *fixed* zu stellen und die Werte für Upper und Lower Limit sind einzutragen. Der gemittelte dB-Wert für diesen Bereich ist dann für jeden Kanal einzeln unter *Goe-m-dB* abzulesen. Insgesamt stehen damit jetzt 7 Werte für die 7 Oktavbänder zur weiteren Bearbeitung bereit. Der Wert unter *Goe-m-dB* entstammt einer Mittlung der dB-Werte im betreffenden Bereich, was genau der STI Definition entspricht, so daß keine Einzelwerte für die jeweils 14 Modulationsfrequenzen abgelesen werden müssen. Allerdings wird hier keine Limitierung auf ±15 dB durchgeführt, so daß zunächst über die Maximum und Minimum Werte (ebenfalls im *spectral statistics* Fenster) geprüft werden sollte, inwieweit der ±15 dB Bereich überschritten wird. Ist dieses der Fall, dann müssen die 14 Werte einzeln abgelesen, bei Bedarf limitiert und dann gemittelt werden. Die folgenden Tabelle zeigt die Resultate für die Beispielfunktion, wo kein Maximum oder Minimum zwischen 0,5 und 16 Hz außerhalb der ±15 dB lag.

Kanal	Ch0	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6
Oktavband	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Goe-μ-dB	4,94	5,37	2,02	3,84	5,48	7,36	8,99
Gewichtungsfaktor	0,13	0,14	0,11	0,12	0,19	0,17	0,14

Der mittlere dB-Wert aus diesen 7 Oktavbändern mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren muß an dieser Stelle von Hand bestimmt werden. Aus der Summe der 7 mit ihren Gewichtungsfaktoren multiplizierten dB-Werte berechnet sich der

Mittelwert. Im Beispiel lautet das Ergebnis 5,63 dB. Damit berechnet sich der lang ersehnte STI Wert zu:

STI = (5,63 dB + 15 dB)/30 dB = 0,687

Fertig !!!

Das alles geht in Zukunft auf Tastendruck ohne lange Rechnerei. Andererseits dürfte die genaue Beschreibung der einzelnen Vorgänge auch dazu dienen den STI Wert und den Umgang mit dem Edit Menu etwas besser zu erlernen.

Ein STI oder RASTI Wert, der auf diese Weise bestimmt wird, ist im strengen Sinne noch nicht komplett, da der Einfluß von Störgeräuschen auf die Modulationstiefe überhaupt nicht berücksichtigt wurde. Der Wert ist damit korrekter Weise als Noiseless STI oder Noiseless RASTI anzugeben.

8.14 Schalldruckpegel messen

Messungen des Schalldruckpegels können mit MF mit oder ohne eigenes Anregungssignal durchgeführt werden. Die Signaldarstellung erfolgt im Zeit- oder Frequenzbereich und wird von einem Infofenster mit einigen statistischen Werten über das Signal ergänzt. Möchte man lediglich feststellen welchen zeitlichen Verlauf bzw. welche spektrale Verteilung das Signal hat, dann wird die Funktion *AD only* (im Zeit- und Frequenzbereich) oder *SPL* (nur im Frequenzbereich) aus dem *AD/DA* Menu verwendet. Soll zusätzlich ein Anregungssignal, z.B. ein rosa Rauschen, ausgesandt werden, dann ist die Funktion *AD & DA simultanously* (im Zeit- und Frequenzbereich) zu verwenden. Das Anregungssignal muß als Zeitsignal mit 2^n Werten in einer entsprechenden Datei (*.DAT) abgelegt sein. Wie 2^n Zeitsignal mit der gewünschten Frequenzgewichtung erzeugt werden, wird Kap. 8.15 ausführlich behandelt.

Für eine richtige Anzeige des Schalldruckpegels muß bei den Funktionen *AD only* und *AD & DA simultanously* der Bezugswert für 0 dB aus der Mikrophonempfindlichkeit und dem Wert von 20µPa für einen Schalldruckpegel von 0 dB errechnet werden. Beträgt z.B. die Mikrophonempfindlichkeit 15 mV/Pa, dann errechnet sich der einzustellende *dB reference* Wert zu $20 \cdot 10^{-6}$ Pa $\cdot$15mV/Pa = $300 \cdot 10^{-9}$ V = 300 nV. Dieser *dB reference* Wert kann nur bei Darstellung im Frequenzbereich eingestellt werden. Die Angabe bezieht sich aber auch auf die dB Werte im Info Fenster des Zeitsignales. Mit der neu überarbeiteten *SPL* Funktion, die allerdings nur im Frequenzbereich zur Verfügung steht, sind diese Berechnung nicht erforderlich, da die Werte für die Mikrophonempfindlichkeit und für ein mögliches externes Preamp Gain hier direkt eingetragen werden können.

Im Zeitbereich wird der Signalverlauf über die eingestellte Länge angezeigt und statistisch ausgewertet. Der maximale SPL (Maximum Level) und der RMS Wert (RMS Level) aus dem jeweiligen Zeitfenster können hier als SPL in dB oder direkt als Ausgangsspannung des Mikrophones abgelesen werden. Ebenso wird aus diesen Werten der Crestfaktor in dB errechnet und angezeigt. Das Signal läßt sich bekannter Form als Zeitsignal abspeichern und so auch später noch weiter auswerten. Welcher Ausschnitt des Zeitsignales für die statistischen Werte betrachtet wird, ist im *Info* Menu unter *Signal statistics* einzustellen.

Sinngemäß gilt das gleiche für die Darstellung im Frequenzbereich. Die eingestellte Anzahl Werte wird zunächst gesampelt, dann bei Bedarf gefenstert und anschließend mit einer FFT in der Frequenzbereich transformiert. Das angezeigt Frequenzspektrum bezieht sich aber immer auf den gesamten Ausschnitt im Zeitbereich, der unter *Length* angegeben

ist. Entsprechend dem betrachteten Zeitausschnitt bei Zeitsignalen kann im Frequenzbereich für das Info Fenster unter `Spectral statistics` ein Frequenzbereich gewählt werden, für den die signalstatistischen Werte bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die möglichen Einstellungen der *AD only* Funktion im Frequenzbereich.

AD only			
Excitation			
Mode	Single		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Averaging	1		Anzahl der Messungen über die gemittelt wird für SPL Messungen immer = 1
AD decimation %	1		Reduzierung der Abtastrate Die Bandbreite wird entsprechend kleiner Die Auflösung wird entsprechend größer
Length	371,5 ms		Länge des ausgewerteten Zeitsignales
Samples/channel	16384		Anzahl der Samples = 2^n
Remove DC	Yes		Gleichanteil vom Zeitsignal abziehen
Windowing			
Window	No		Fensterfunktion für das Zeitsignal vor der FFT
Type	Bl-H. 4-Term symmetrical Range: all		Fenstertyp und Form
Spectral processing			
Equalizing	None		None: keine Bewertung im Frequenzbereich File: Bewertung über eine vorgegebene Spektrumsdatei A-weigh: A-Bewertung

AD only			
			Sinc(x): (sin x)/x Bewertung J-filt: Bewertung über ein mit J-Filter definiertes Filter (siehe auch 10.4)
Smooth	No		Glättung im Frequenzbereich
Channel combine	none		Ch0 und Ch1 bei zweikanaliger Messung miteinander verknüpfen
Display			
Dynamic Range	140 dB		Darstellungsbereich
On top	0 dB		Maximalwert des Darstellungsbereiches
Ref. for 0 dB	0 dBu		Bezugswert für 0 dB Max: größter Wert im Spektrum Fixed: einstellbarer Wert 0 dBu: 775 mV AD FS: AD-Umsetzer Vollausst.
dB reference	0 dBu		Einstellbarer Bezugswert für 0 dB bei fixed Spannung in V errechnet sich aus dem Produkt der Mikrophonempfindlichkeit in V/Pa und dem Bezugswert von 20µPa für 0 dB SPL
Info Window	Yes		Infofenster

Tabelle 35 Das Menu *AD/DA AD only* mit Einstellungen für SPL Messungen

In der Funktion *AD & DA simultanously* gibt es zusätzlich zu denen in Tabelle 35 aufgeführten Einstellmöglichkeiten noch die Auswahlmöglichkeit für das ausgesandte Zeitsignal und dessen Pegel.

Ein abschließendes Beispiel zeigt eine typische Anwendung. Eine Lautsprecheranlage soll zunächst so eingemessen werden, daß bei Anregung mit Rosa Rauschen im Zuschauerbereich ein SPL von 80 dB mit C-Bewertung vorliegt, wenn das Signal mit einem RMS Wert von –8 dBu in die Anlage eingespeist wird. Ein 16K langes Zeitsignal

mit Rosa Rauschen findet sich in der Datei PINK-16K.DAT, die unter Signal File eingetragen wird. Das Meßsystem wird mit `Strg M` in den Frequenzbereich geschaltet und dann im *`AD/DA`* Menu die Funktion *`AD & DA simultanously`* aufgerufen. Zunächst ist jetzt der gewünschte Ausgangspegel für das rosa Rauschen von –8 dBu einzustellen. Mit einem XLR Kabel ist dabei der entsprechende Eingang des Meßsystems mit einem der Ausgänge zu verbinden. Die Messung wird gestartet ohne *Equalizing File (none)* und ohne Glättung *(Smooth: no)*. Als Referenz für 0 dB ist 0 dBu zu wählen. Im Infofenster kann dann unter *Level overall* der Pegel direkt in dBu abgelesen werden. Der berücksichtigte Frequenzbereich beträgt 0-20k Hz. Die notwendigen Korrekturen können anschließend im Meßmenu mit der Leveleinstellung vorgenommen werden. Das zugehörige Spektrum, das Meßmenu und das Infofenster zeigt Abbildung 87. Reicht der Einstellbereich nicht aus, so ist unter *`basic settings`* der *DA fullscale* Wert zu erhöhen.

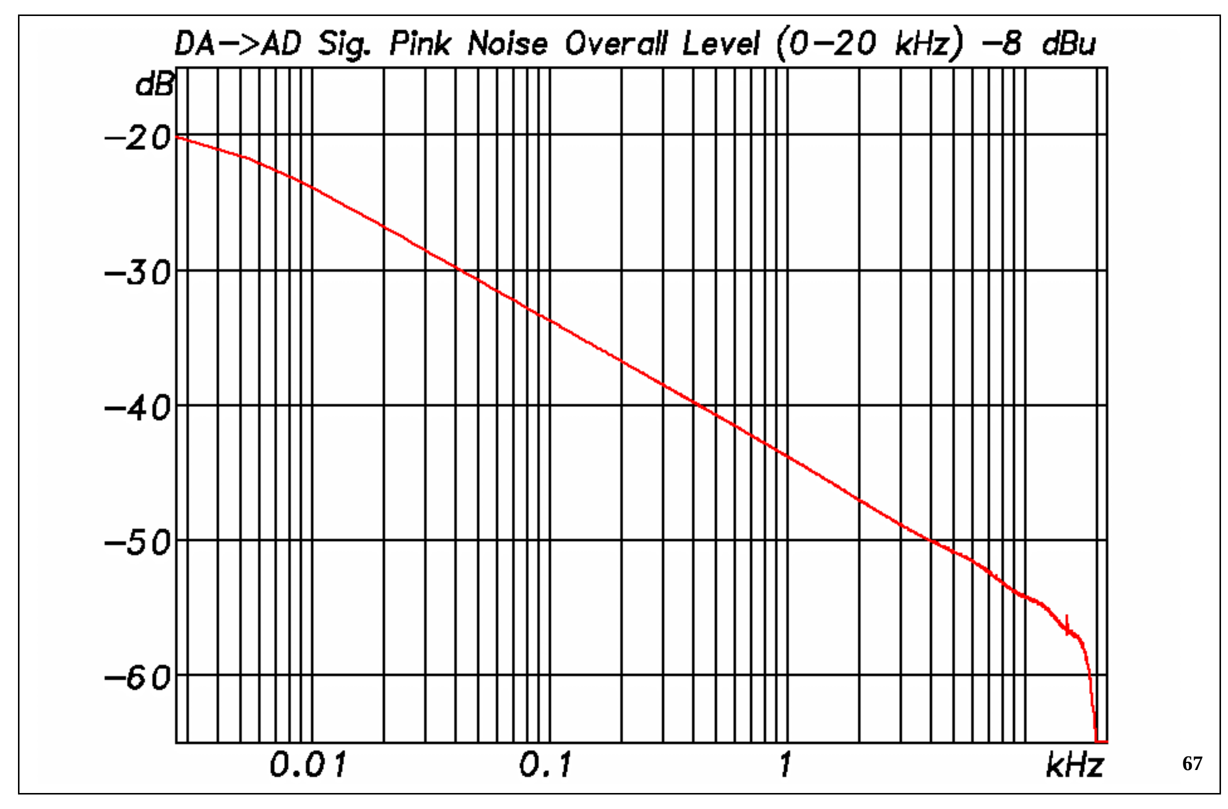


Abbildung 87 Einpegeln des Meßsystems mit Rosa Rauschen auf -8 dBu Ausgangspegel

```
------------------- Excitation --------------------

Mode             : single/repeat

Pre sends        :        1

Averaging        :        1

AD decimation %  :        1

Level ñ          :        0 dB FS   -0.0 dBu
Signal file      : PINK-16K.DAT
Remove DC        : no/yes
------------------- Windowing ---------------------
Window           : no/yes


-------------- Spectral processing ----------------
Equalizing       : none/file/A-weigh/sinc(x)/J-filt


Smooth           : no/yes
-------------------- Display ----------------------
Dynamic range    :       50 dB
On top           :      -15 dB
Ref. for 0 dB    : Max/fixed/0 dBu/AD FS
dB reference     :  774.5967 mV     0.0 dBu
Info window      : no/yes
---------------------------------------------------
```

Meßmenu `AD & DA simultanously` beim Einpegeln des Ausgangssignales

```
Region        : cursor/fixed

Lower limit   :        0 Hz

Upper limit   :       20 kHz

---- U eff --------- Ch 0 -----------
Maximum       :   76.4402 mV
Minimum       :    9.1643 µV
Max-Min       :    76.431 mV
Average       :    3.3133 mV
Overall       :  285.6182 mV
---- Level --------------------------
Maximum       :   -20.115 dBu
Minimum       :    -98.54 dBu
Max-Min       :    78.424 dB
Average       :   -47.376 dBu
Overall       :   -8.0658 dBu
```

Zugehöriges Info Fenster mit Statistischen Signalparametern zu Abbildung 87

Wenn der Ausgangspegel entsprechend eingestellt ist, kann das Meßmikrophon angeschlossen werden und der dB Referenzwert auf die Mikrophonausgangsspannung bei 20µPa Schalldruck angepaßt werden. Unter Equalizing File wird eine Datei (C-KURVE.SPK), die als Frequenzgang die C-Bewertung enthält, eingestellt. Die Resultat der Messung und den Frequenzgang der C-Bewertung zeigt Abbildung 88.

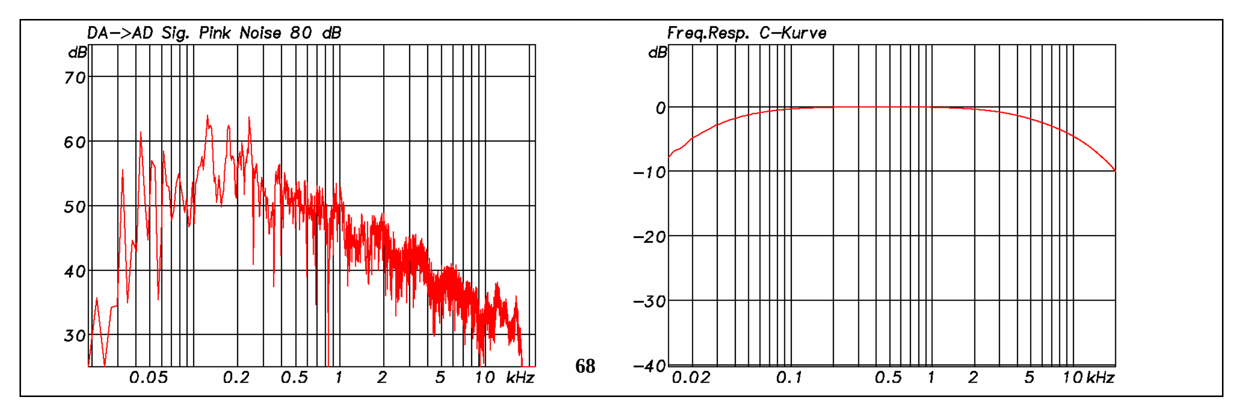


Abbildung 88 Einpegeln der Lautsprecheranlage auf 80 dB SPL und Frequenzgang der C-Bewertung

```
------------------- Excitation --------------------

Mode               : single/repeat

Pre sends          :         1

Averaging          :         1

AD decimation %    :         1

Level ñ            :         0 dB FS    -0.0 dBu
Signal file        : PINK-16K.DAT
Remove DC          : no/yes
------------------- Windowing ---------------------
Window             : no/yes


-------------- Spectral processing ----------------
Equalizing         : none/file/A-weigh/sinc(x)/J-filt
Equalizing file    : C-KURVE.SPK

Smooth             : no/yes
-------------------- Display ----------------------
Dynamic range      :        50 dB
On top             :        75 dB
Ref. for 0 dB      : Max/fixed/0 dBu/AD FS
dB reference       :       300 nV    -128.2 dBu
Info window        : no/yes
---------------------------------------------------
```

Meßmenu `AD & DA simultanously` bei der Messung der Lautsprecheranlage

```
Region          : cursor/fixed

Lower limit     :         0 Hz

Upper limit     :        20 kHz
---- U eff --------- Ch 0 -----------
Maximum         :  474.8375 µV
Minimum         :  182.6652 nV
Max-Min         :  474.6548 µV
Average         :   37.8507 µV
Overall         :    3.2629 mV
---- Level -------------------------
Maximum         :    63.988 dB
Minimum         :   -4.3093 dB
Max-Min         :    68.298 dB
Average         :    42.019 dB
Overall         :     80.73 dB
```

Zugehöriges Info Fenster mit Statistischen Signalparametern zu Abbildung 88

In einem dritten Arbeitsschritt soll noch der Frequenzgang an der Hörerposition im Raum mit Rosa Rauschen auf eine Wunschfunktion hin mit einem Terz EQ eingestellt werden. Die C-Bewertung ist für diese Messung wieder abzuschalten (*Equalizing File: none*). Alle anderen Einstellungen bleiben erhalten. Zusätzlich wird eine Glättung (*Smooth: yes*) mit folgenden Parametern eingeschaltet.

```
Smoothing of     : magnitude/group delay/both

Process          : continous/steps

Method           : averaged/added
Reference        :         1 kHz
Bandwidth        : 1 /   3.00 - octave

Region           : cursor/fixed
```

Geglättet wird der Betrag des Spektrums in 1/3 Oktav bzw. Terz-Schritten. Zu unterscheiden sind die beiden Verfahren des Mittelns (averaged) über einen bestimmten Bereich oder alle Frequenzlinien innerhalb dieses Bereiches aufzuaddieren (added). Durch den linearen Abstand der Frequenzlinien verdoppelt sich die Dichte der Frequenzlinien bei einer Frequenzverdoppelung, womit sich auch die Betragssumme der einzelnen Frequenzlinien innerhalb einer Oktave jeweils um 3 dB, bzw. innerhalb einer Terz um 1 dB erhöht. Ein Rosa Rauschen, mit einem Pegelabfall von 3 dB pro Oktave, d.h. mit einer konstanten Leistungsdichte über der Frequenz, würde in dieser Darstellungsform genau diesen Anstieg kompensieren und eine gerade Linie ergeben. Dieses Meßverfahren entspricht damit der bekannten Einmeßmethode mit einem Rauschgenerator und einem Terz Analyser. Da hier auch alle Raumeinflüsse mit in die Messung eingehen, sollte nicht auf einen linearen Frequenzgang eingemessen werden. Ein linear abgestimmter Lautsprecher würde im Freifeld mit dieser Meßmethode natürlich auch einen völlig geraden Verlauf erzeugen. Abhängig von der Nachhallzeit des Raumes in den verschiedenen Frequenzbändern kommt es aber zu starken Abweichungen vom geradlinigen Verlauf. In tieffrequenten Bereichen, wo die Nachhallzeit in der Regel länger ist, ist die Gesamtenergie im Raum höher als bei hohen Frequenzen. Wirklich sinnvoll ist diese Meßmethode daher nur dann, wenn die Nachhallzeiten des Raumes bekannt oder vorgegeben sind und eine entsprechende Zielfunktion für die Einmessung vorliegt. Bewährt hat sich diese Technik für die schnelle Einmessung von Kinosystemen, wo durch Vorgaben bestimmte Nachhallzeiten angestrebt werden, so daß der Raumeinfluß im Idealfall in allen Kinos der gleiche sein sollte. Abbildung 89 zeigt diese Kurve, die mit Rosa Rauschen in Terzbändern eingemessen wird.

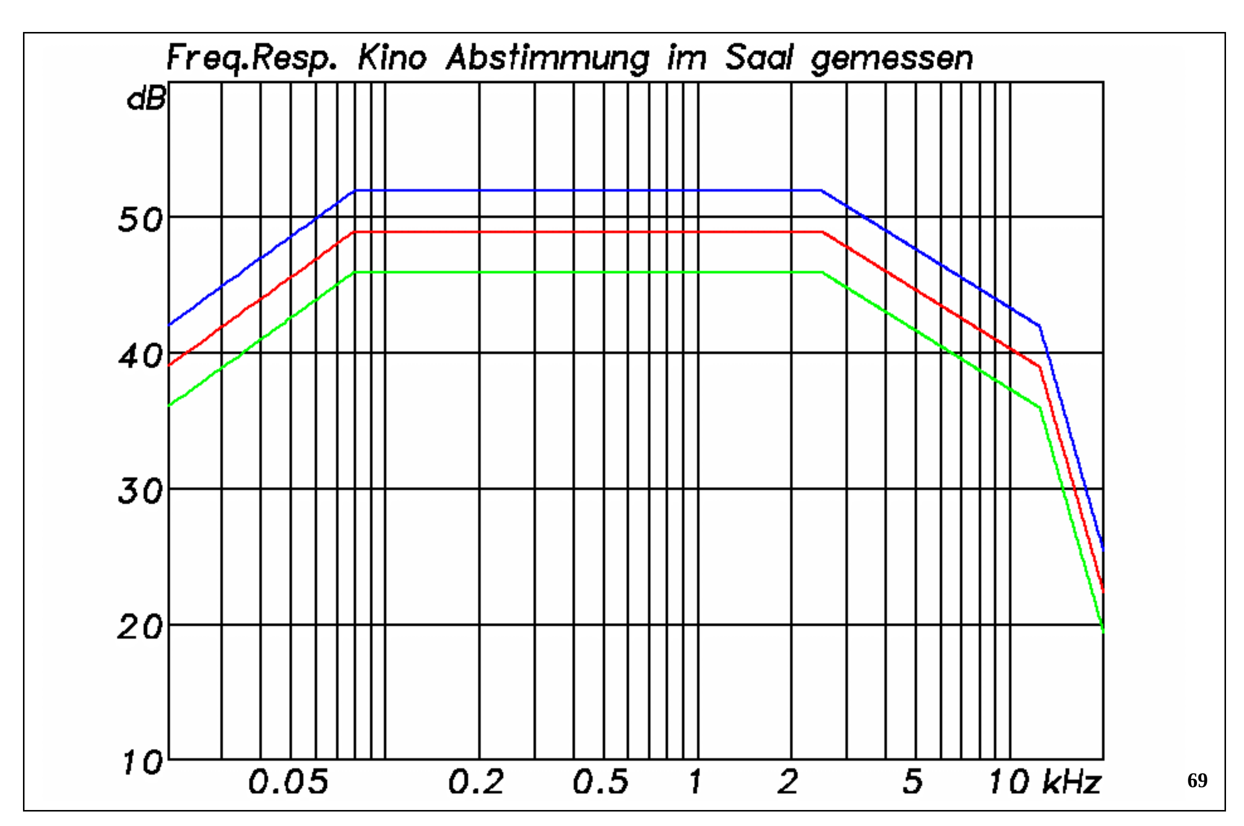


Abbildung 89 Zielfunktion (rt) mit Toleranzbereich (bl-gr) für Kinosysteme ohne Sub Kanal im Saal gemessen

8.14.1 Die Sound pressure level Funktion

Die SPL Funktion wurde aktuell neu erstellt und beinhaltet die unter 8.14 schon beschriebenen Funktionen `AD & DA simultanously` und `AD only`. Der Unterschied besteht darin, daß die SPL Funktion schon für Schallpegelmessungen vorbereitet ist und hier einige Werte direkt eingetragen werden können, wie z.B. die Mikrophonempfindlichkeit. Andere bei der Schallpegelmessung nicht erforderliche Einstellung wurden zur besseren Übersichtlichkeit weggelassen.

Sound pressure level			
Measurement conditions			
Mic sensitivity	15 mV/Pa		Hier ist die Mikrophonempfindlichkeit in mV/Pa einzutragen.
Mic preamp gain	0 dB		Wenn ein externer Mikrovorvestärker verwendet wird, so ist dessen Verstärkung hier einzutragen. (sonst = 0 dB)

Sound pressure level			
Mode	single/**repeat**		Einzelmessung oder Dauerbetrieb
Degree	14		FFT Länge für die Signalanalyse ohne Anregungssignal, sonst wird die Länge des 2^n Werte langen Anregungs-signales automatisch gewählt
Excitation			
with excitation	no/**yes**		Während der Messung ein zusätzliches Anregungssignal aussenden
Pre sends	0		Vor dem eigentlichen Meßvorgang ausgesandte Folgen
Averaging	1		Anzahl der Messungen über die gemittelt wird für SPL Messungen immer = 1
Level ±	-20 dB FS		Pegel des Anregungssignales
Signal file	C:\MAXIDAT\ PINK_NOI.DAT		Quelldatei für das Anregungssignal
Windowing			
Window	**yes**/no		Fensterfunktion für das Zeitsignal vor der FFT
Type Mode	Bl-H. 4-Term symmetrical Range: all		Fenstertyp und Form
Spectral processing			
Equalizing	None		None: keine Bewertung im Frequenzbereich File: Bewertung über eine vorgegebene Spektrumsdatei

Sound pressure level			
			A-weigh: A-Bewertung Sinc(x): (sin x)/x Bewertung J-filt: Bewertung über ein mit J-Filter definiertes Filter (siehe auch 10.4)
Smooth	yes/**no**		Glättung im Frequenzbereich
Display			
Dynamic Range	100 dB		Darstellungsbereich
On top	100 dB		Maximalwert des Darstellungsbereiches
Info Window	no/**yes**		Infofenster

Tabelle 36 Das Menu *SPL...* **mit Einstellungen für SPL Messungen**

Eine typische Anwendung für die SPL Funktion wäre es z.B. den Schalldruckpegel in einem Raum zu messen. Ein Anregungssignal ist dabei nicht erforderlich (*with excitation = no*). Nach der Einstellung der Mikrophonempfindlichkeit und der Verstärkung eines möglicher Weise vorhandenen externen Vorverstärkers (z.B bei B&K Mikrophonen mit 200 V Polarisationsspannung) kann die Messung im Dauerbetrieb (*Mode = repeat*) mit der gewünschten Auflösung gestartet werden. Der Meßzeitraum und die Frequenzauflösung werden über den Grad der FFT (*Degree*) eingestellt. Ein Standardwert ist Degree=14. Der analysierte Zeitabschnitt ist damit 2^{14}/44100 Hz = 371,5ms lang und die Frequenzauflösung beträgt (44100 Hz)/2^{14} = 2,69 Hz. Bei Bedarf kann der Wert vergrößert oder verkleinert werden. Als Fensterfunktion empfiehlt sich ein Blackman-Harris-4-Term Window symmetrisch angeordnet über den gesamten Zeitausschnitt (*range=all*). Unter Spectral processing kann eine Bewertungsfunktion gewählt werden, wobei die A-Bewertung und eine sinc(x) Funktion direkt angewählt werden können. Andere Filterfunktionen können als Datei geladen (file) oder mit J-Filter erstellt werden. Sobald die Option J-Filter für das Bewertungsfilter gewählt ist, kann direkt aus dem SPL Fenster in ein J-Filter Fenster gesprungen und dort die Filterfunktion eingestellt werden. Ein Glättung sollte zunächst nicht eingeschaltet werden (*smooth=no*), da ansonsten schmalbandige Peaks im Frequenzspektrum verschleiert werden könnten. Mit dem zusätzlichen Infofenster (Info window = yes) kann während der Messung ein sich ständig aktualisierendes Fenster mit der Spektrumsstatistik eingeblendet werden. Der ausgewertet

Frequenzbereich wird oben angezeigt und kann vorab unter *Spectral statistics* im *Info* Menu eingestellt werden.

8.15 Testsignale generieren

Die Integration eines DA-Wandlers in ein Meßsystem bietet die wichtige Möglichkeit, Meßsignale per Software zu synthetisieren bzw. als Datei abzurufen. Dadurch wird der zweite FFT-Kanal obsolet, da das Anregungssignal deterministisch ist und sein Spektrum somit nur einmal berechnet zu werden braucht. Bei periodischer Wiederholung ist es diskret, wobei Amplitude und Phase jeder enthaltenen Frequenz völlig unabhängig eingestellt werden können. Auf diese Weise können beispielsweise beliebig gefärbte Rauschsignale aus vorgegebenen Amplitudenspektren generiert werden, indem sämtliche Phasen des Spektrums per Zufallsgenerator ausgewürfelt werden. Das Meßsignal erhält man dann direkt durch eine IFFT. Eine Optimierung des Crestfaktors, also der Leistung bei gegebener Maximalamplitude, läßt sich erzielen, wenn statt dessen dem Spektrum einer Maximalfolge die Phasen „entwendet“ werden. So lassen sich Meßsignale gewinnen, die den korrespondierenden Maximalfolgen in allen Eigenschaften sehr ähnlich sind, aber die vorteilhafte Länge 2^n besitzen.

Die Sweepsignale mit Amplitudenspektrumsvorgabe gelingen besonders gut, wenn das Vorgabespektrum zunächst 0-phasig in den Zeitbereich transformiert und die symmetrische Impulsantwort dort mit einem Fenster, welches höchstens halb so breit wie der Zeitausschnitt ist, behandelt wird. Nach Rücktransformation in den Frequenzbereich kann der gewünschte Laufzeitverlauf aufgeprägt werden. Nach abschließender IFFT steht das Sweepsignal zur Verfügung, welches dank dieser Spezialbehandlung überlappungsfrei ist. Soll ein Sweepsignal mit logarithmischem Frequenzinkrement einen konstanten zeitlichen Amplitudenverlauf aufweisen, so muß das Betragsspektrum mit 3 dB/Oktave fallen.

In Abbildung 90 sind zwei Signale, die aus dem selben Betragsspektrum hervorgegangen sind, zu sehen. Trotz identischer Leistung jeder enthaltenen Frequenz scheinen die korrespondierenden Zeitsignale auf den ersten Blick nichts gemein zu haben. Das gesuchte Übertragungsverhalten ergibt sich aus den Messungen, genau wie bei der Zweikanal-FFT-Analyse, durch Division des Ausgangsspektrums mit dem Spektrum des Anregungssignals. Im ungestörten Fall ergeben sich dabei die gleichen Resultate.

Dank der Möglichkeit, das Amplitudenspektrum und die Phase eines periodischen Meßsignals im Frequenzbereich frei und beliebig diktieren zu können, lassen sich per inverser diskreter Fouriertransformation praktisch beliebige Meßsignale beliebiger Längen erzeugen. Sind sie für die Auswertung mit Hilfe von FFTs bestimmt, die bekanntlich nur auf periodische Signale der Länge 2^n angewandt werden können, so ist ihre Länge

natürlich ebenfalls auf ganzzahlige Zweierpotenzen beschränkt. Dies stellt in der Praxis aber keine große Behinderung dar; reicht die Frequenzauflösung, die sich zu

$df = f_s/N$ f_s = Abtastrate und N = Anzahl der Abtastwerte

ergibt, nicht aus, so läßt sie sich eben durch Wahl der nächst höheren Zweierpotenz verdoppeln.

Pseudorauschsignale der FFT-typischen Länge von 2^n werden in letzter Zeit gerne in einigen FFT-basierten Meßsystemen eingesetzt. Sie kursieren unter dem etwas befremdlichen Namen „Multi-Sinus-Signal“, womit wohl zum Ausdruck gebracht werden soll, daß das periodische Meßsignal sich aus einer definierten Anzahl von Sinusschwingungen kontrollierter Amplitude und Phase zusammensetzt. Selbstverständlich gilt dies aber für *jedes* beliebige periodische Signal, natürlich auch für die hier vorgestellten *Maximalfolgen*, zu denen die Multi-Sinus-Signale gerne in Kontrast gesetzt werden. Vorteilhaft für die Verwirklichung eines Meßsystems ist aber, daß die simple FFT des Ausgangssignals eines zu untersuchenden Systems, gefolgt von der Division durch das Anregungsspektrum, zur Ermittlung der Übertragungsfunktion ausreicht. Daraus läßt sich per IFFT die Impulsantwort gewinnen, in der bei Bedarf (der bei akustischen Messungen fast immer gegeben ist) Störungen und Reflexionen ausgefenstert werden können. Die so bereinigte Impulsantwort kann dann per FFT wieder in den Frequenzbereich überführt werden, womit die Anzahl der nötigen Transformationen für einen vollständigen Meßdurchlauf auf drei ansteigt. Der Rechenzeitbedarf ist damit in etwa doppelt so hoch wie beim vorgestellten Maximalfolgen-Meßverfahren, was aber angesichts der mittlerweile verfügbaren Rechenleistung aktueller Computermodelle nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Für neu zu entwickelnde Meßsysteme hat der Einsatz von Maximalfolgen daher stark an Attraktivität eingebüßt.

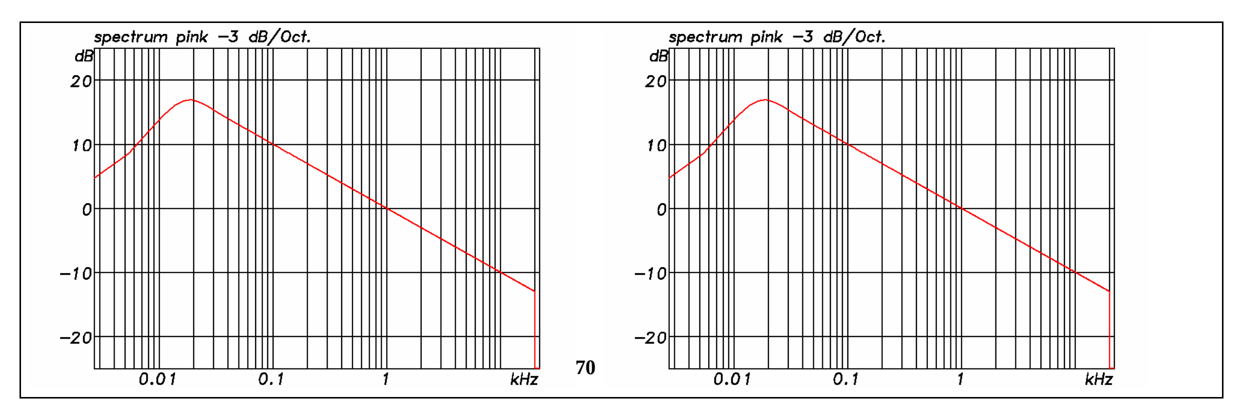


Abbildung 90 Amplitudenspektrum für Pink Noise (li) und Pink Sweep (re)

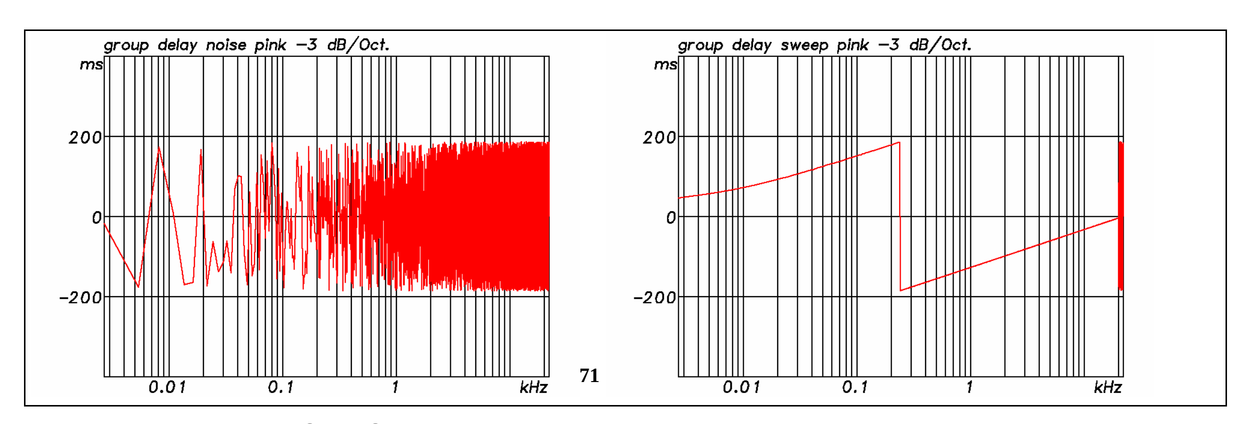


Abbildung 91 Laufzeit für Pink Noise (li) und Pink Sweep (re)

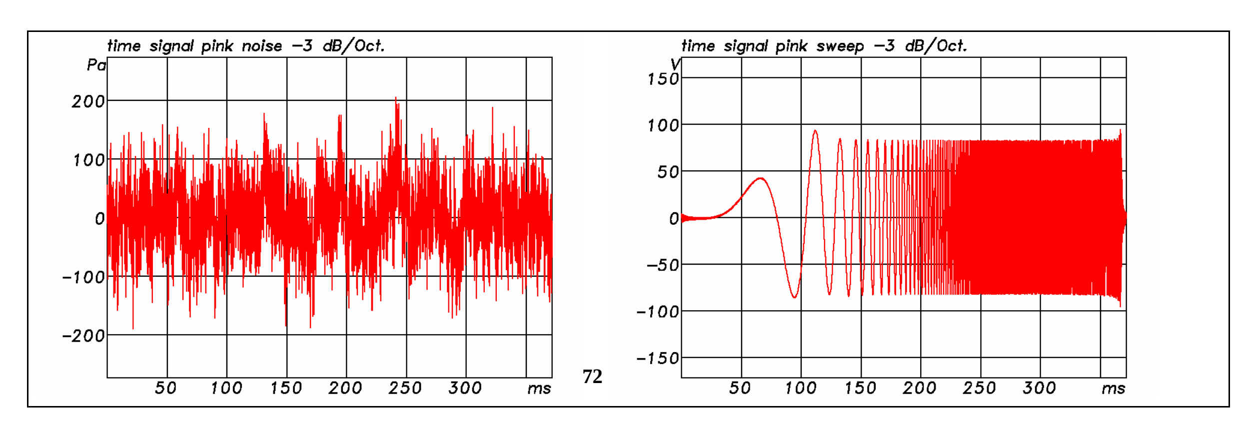


Abbildung 92 Zeitsignale für Pink Noise (li) und Pink Sweep (re)

Im folgenden ist der Arbeitsablauf zur Erzeugung beliebiger 2^n Signale aufgelistet.

1 Eine neue Datei mit einem Frequenzspektrum wird angelegt, soweit nicht bereits eine Meßdatei oder ähnliches existiert. Im `File` Menu ist dazu der Grad (*Degree*) entsprechend der gewünschten Frequenzauflösung zu wählen und anschließend die neue Datei mit *New* zu öffnen.
Beispiel: Auflösung $df = f_s/2^n$ mit f_s = Abtastrate und n = Grad

$df = 44100/2^{14} = 2{,}69$ Hz
Rechts unten am Bildschirm ist die Frequenzauflösung abzulesen.

2 Das Wunschspektrum wird erzeugt. Quelle kann eine Meßdatei, J-Filter oder ein beliebiges anderes Frequenzspektrum aus MF sein.

3 Bearbeitungsbereich so auswählen, daß das gesamte Spektrum betroffen ist. Linker Cursor bei 0 Hz und rechter Cursor am rechten Rand bei 22,05 kHz.
Tastenkombination Shift E (↑E) für *Entire*.
Die Phase ist zunächst zu Null zu setzen. `Edit` Menu: `Phase`: Set = 0°

4 Dem Wunschspektrum wird über das `Edit` Menu mit `Group delay` eine Laufzeit hinzugefügt. Soll das Resultat eine Rauschsignal sein, dann ist die Laufzeit mit der *random* Einstellung zufällig zu setzen. Soll das Resultat ein Sweepsignal sein, dann ist die Laufzeit mit logarithmischem Frequenzinkrement zu setzen. Die Einstellung unter *Mode* lautet dann *log inc*. Für diesen Fall sind noch der Start- und Endwert am linken bzw. rechten Cursor einzugeben. Typischerweise wird der linke Cursor auf eine Laufzeit von 0 gesetzt werden und der rechte entsprechend der Länge des Zeitsignales, die sich aus der Anzahl der Werte durch die Abtastfrequenz errechnet.
Beispiel: Länge = $2^n/f_s = 2^{14}/44.100\ s^{-1} = 16384/44.100\ s^{-1} = 371{,}52$ ms
mit f_s = Abtastrate und n = Grad

5 Das gewünschte Signal liegt nun im Frequenzbereich mit Amplitude und Laufzeit vor und bedarf noch einer Transformation in den Zeitbereich über eine inverse FFT. Hierfür den Bearbeitungsbereich so auswählen, daß das gesamte Spektrum betroffen ist. Linker Cursor bei 0 Hz und rechter Cursor am rechten Rand bei 22,05 kHz. Anschließend im `Trans` Menu die Funktion `IFFT` auswählen.

6 Das berechnete Zeitsignal kann jetzt abgespeichert und für Messungen verwendet werden.

7 Im entsprechenden Meßmenu ist als *Exciter 2^n-signal* einzustellen und der Dateiname des Zeitsignales unter *Signal file* einzutragen. Die Option *Build impulse response* wird für 2^n-Signale fest auf *post comp* geschaltet.

9 Technische Daten des Meßsystem mit ITADDA16

Das ITADDA16 basiert auf einer AD/DA ISA Steckkarte mit einem Crystal CS4231 Chip. AD- und DA-Umsetzer liefern eine nomineller Auflösung von 16 bit bei einer Abtastrate von 5,5 bis 48 kHz. Das zugehöriger Frontend ist ebenfalls komplett zweikanalig aufgebaut und verfügt über Line Ein- und Ausgänge sowie zwei Meßendstufen und zwei Mikrophonvorverstärker mit 48 V Phantomspeisung.

Max. Ausgangspegel am sym. Line-Ausgang:	20 dBu (> 600 Ohm)
Max. Ausgangspegel am Endstufenausgang:	23 dBu (> 4 Ohm)
Eingangsempfindlichkeit in dBu:	schaltbar -40, -20, 0, +20, +40 dBu
Eingangsempfindlichkeit in V_{eff}:	7,75 mV, 77,5 mV, 775 mV, 7,75 V 77,5 V
Eingangsimpedanz:	5 kOhm
Störabstand bei -20..+40 dBu fs:	typ. 75 dB
Klirrfaktor bei 14 dBu 20-20k	typ. -80 dB (0,01%)
Phantomspeisung:	48 V schaltbar auf beiden Eingängen

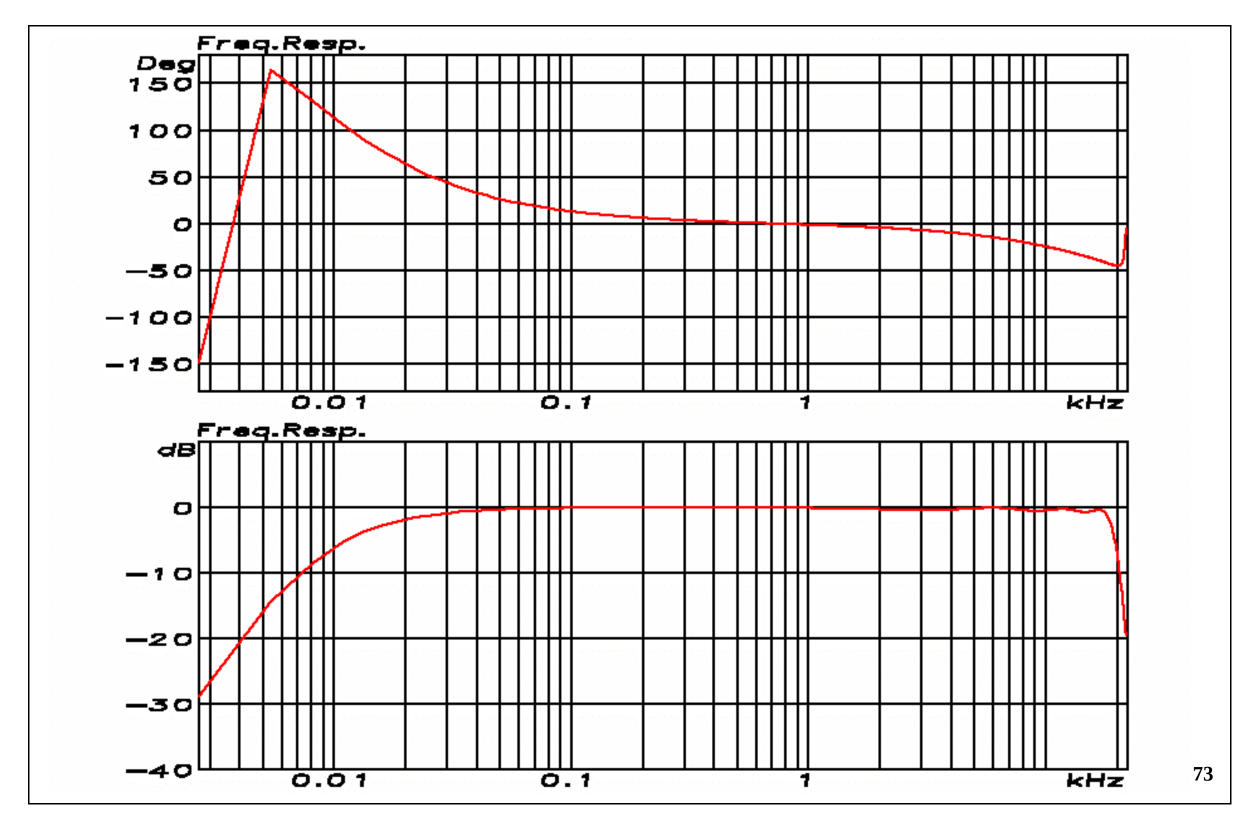


Abbildung 93 Phasengang und Frequenzgang ohne Kompensation

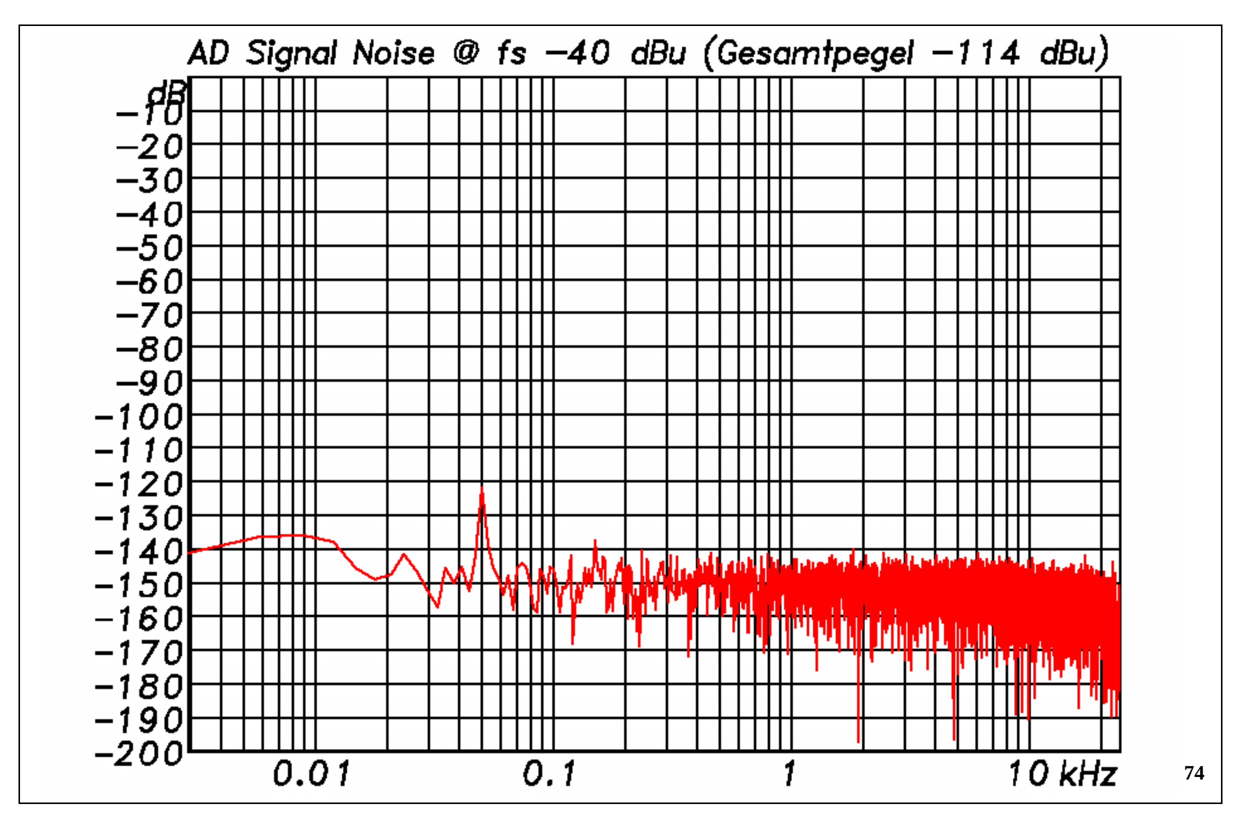


Abbildung 94 Störspektrum am Eingang bei -40 dBu Eingangsempfindlichkeit

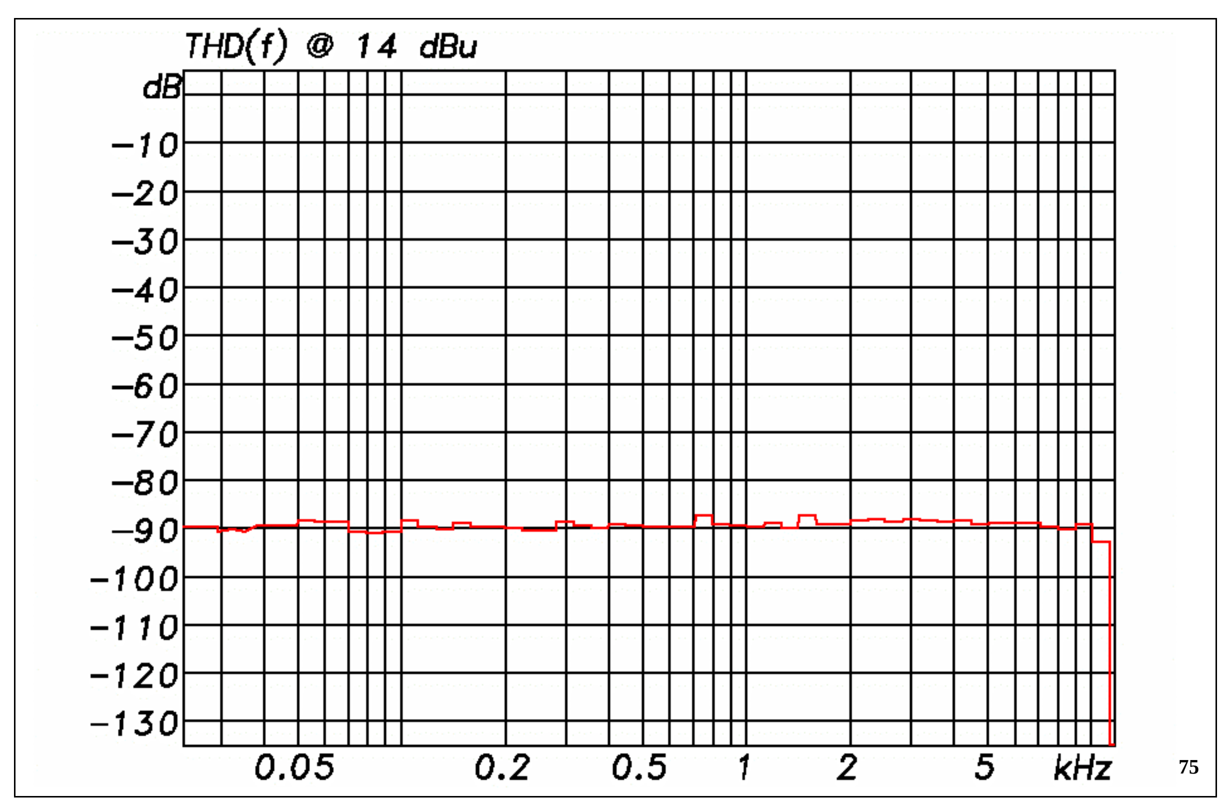


Abbildung 95 Klirrfaktor über der Frequenz bei gleichzeitigem AD/DA Betrieb mit +14 dBu Pegel

10 Option Crossover Works

Dieses Kapitel befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung und ist nicht mehr ganz auf dem aktuellen Stand.

In den folgenden Absätzen werden die einzelnen Menüpunkte des Crossover Menu im Detail aufgelistet und kurz mit einigen Stichworten erläutert. In den Tabellen finden sich Symbole zur Bedeutung der einzelnen Parameter. Alle Parameter in den Setups und Format-Einstellung sind standardmäßig so gesetzt, daß der Betrieb mit Hugo problemlos möglich ist. Bei Verwendung einer nicht Hugo kompatiblen DSP-Hardware müssen die Einstellungen angepaßt werden. Alle Einstellungen sind für Hugo und seinen kleinen Bruder LCH identisch.

Symbol	
💻	Nur für Servicezwecke ; nicht verstellen
👓	Nur zum Ablesen ; keine Eingabe vorgesehen
✋	Vorsicht, eine Veränderung der Einstellung sollte nur bei hinreichender Kenntnis der Hardware und Signalverarbeitung erfolgen
💣	Wichtiger Parameter, der für den Betrieb mit Hugo keinesfalls verändert werden darf
⌨	Eingabe erforderlich

Tabelle 37 Symbole

10.1 Setup file menu

Das `Setup file` Menu ist das Standard Dateimenu von MF und enthält alle zur Dateiverwaltung bekannten Funktionen. Für jeden berechneten Filtersatz wird eine gleichnamige Datei mit der Endung FCS abgespeichert, die alle Einstellung im Crossover Menu für diesen Filtersatz beinhaltet. Die Einstellungen können daher jederzeit über diese FCS Datei reproduziert werden. Neben den Ursprungsdaten der Lautsprecher sollte auch noch die Targetfunktion abgespeichert werden. Mit einem Datensatz aus den Lautsprechermessungen, der Targetfunktion und der FCS Datei ist dann die Erstellung eines Datensatzes für den Digitalcontroller komplett dokumentiert.

Parameter	Bedeutung	
Path	aktueller Pfad	
Mash	Dateimaske (für Setups Files hier *.FCS)	
Name	Dateiname	
Load	Datei laden	
Save	Datei speichern	
Rename	Dateiname ändern	
Delete	Datei löschen	
Make Dir	Neues Verzeichnis anlegen	
Remaining	freier Speicherplatz auf dem aktuellen Laufwerk	
Exit MF	MF verlassen	
DOS command	Wechsel auf die DOS Ebene	
Sort	Sortierkriterium für die Dateiliste Name/Datum/Größe ; aufwärts/abwärts	

Tabelle 38 Eingabefenster `Setup file` unter `Crossover work` im Menu Edit

10.2 General settings

Im `General Settings` Menu wird die grundsätzliche Betriebsart der digitalen Frequenzweiche festgelegt. Dazu gehören z.B. die Abtastrate oder die Anzahl der Wege. Ebenso sind hier die für Hugo spezifischen Einstellung für das Koeffizientenformat vorzunehmen. Alle Einstellung sind als Standard für Hugo gesetzt. Sollen die errechneten Koeffizienten auf anderen Geräten geladen werden, so ist das Format leicht anzupassen im Fenster `Coef Format`.

Parameter	Bedeutung	
Ways	Anzahl der benutzten Wege im Hugo Bei internem Mehrwege-Betrieb sind diese auch hier anzugeben, Maxwert: 4	⌨
Sampling Rate	Abtastrate 44,1 oder 48 kHz	⌨
FFT degree	FFT Grad für alle Berechnung zur Koeffizientenerzeugung Standardeinstellung ist 14 Bei mehr als 512 Koeffizienten im Sub oder Low Weg muß der Grad auf 15 erhöht werden.	✋
Window type	Fenstertyp für die Filterfunktionen Standard ist Kaiser Bessel	✋
Measured with	bezieht sich auf die Dateien mit den Lautsprechermessung, die zur Berechnung der Filter benötigt werden. Wurden diese schon über den Hugo gemessen oder mit einem externen System ?	⌨
Overwrite files	Koeffizientendateien mit oder ohne Vorwarnung überschreiben	⌨
Coefficients	Anzahl der Koeffizienten in den einzelnen Wegen	⌨
Coef format ...	Koeffizienten Format	✋💣
... Format	Ausgabeformat der Koeffizientendateien (auch ASCII Format möglich), Standard: ITA	✋💣
... Size	Koeffizientendarstellung in X bytes, Standard: 4 byte	✋💣
... Byte order	Byte-Abfolge, Standard: Intel	✋💣

Parameter	Bedeutung	
Setup ...	Hardware Setup für Hugo	✋
... Downsampling	Sub: 16-fach fg = 1,0 kHz Low: 16-fach fg = 1,0 kHz Mid: 4-fach fg = 4,0 kHz High: 1-fach fg = 22,0 kHz	👓
... Max coefs	Maximale Anzahl der Koeffizienten bezüglich des Speicherplatzes, die Rechenleistung wird hier nicht berücksichtigt. Sub: 700 ; Low: 650 ; Mid: 480 ; High: 300	✋
Filter MIPS	Rechenleistung, die von der momentanen Einstellung benötigt wird. Bei Überschreitung des für Hugo gesetzten Wertes im Setup wird eine Warnung ausgegeben. Maxwert: 19 MIPS bei DSP56009/80	👓
FIR multipath	interne Aufteilung eines Weges auf mehrere Zweige mit unterschiedlichen Downsamplingstufen. none interne Wege = externe Wege mid+high mid und high intern → high output low+mid low und mid intern → mid output low+mid+high low, mid, high intern → high output	

Tabelle 39 Eingabefenster General Settings unter Crossover work im Menu Edit

10.3 Target response

Der Menupunkt `Target response` erlaubt die Eingabe einer Zielfunktion, die dem entspricht, wie später der Wunschfrequenzgang des Lautsprechersystems mit der digitalen Frequenzweiche sein soll. Grundsätzlich sind hier nur die obere und untere Grenzfrequenz mit einer gewünschten Filterfunktion anzugeben. Weitere Manipulationen des Frequenzganges können unter `Freq. response = user defined` vorgenommen werden. Eine einfachere und bessere Möglichkeit ist es aber, die in der Datei XT.SPK abgespeicherte Zielfunktion mit `J-Filter` aus dem `Edit` Menu zu bearbeiten. Es wird zunächst die Datei XT.SPK geladen und dann in `J-Filter` die Einstellung *Mode=filt* gewählt. Hier kann jetzt mit den bekannten Filterfunktionen aus der Analogtechnik ein Frequenzgang vergleichbar mit einem voll parametrischen EQ eingestellt werden. Optional besteht die Möglichkeit den zugehörigen Phasengang mit zu berücksichtigen oder nur den Amplitudenverlauf zu übernehmen. Die Auswahl erfolgt über *Phase=complex/0°*.

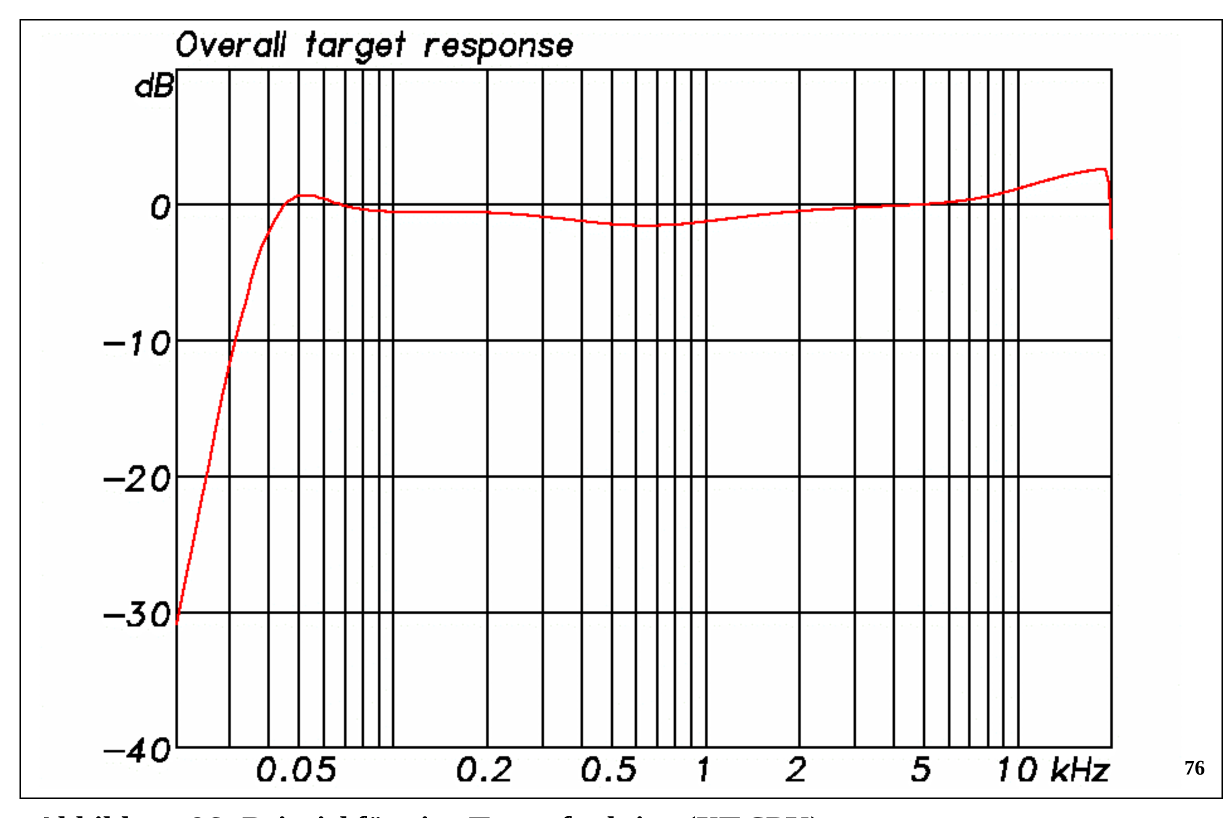


Abbildung 96 Beispiel für eine Targetfunktion (XT.SPK)

Parameter	Bedeutung	
Upper boundary		
Cut off (-6 dB)	Obere Grenzfrequenz der Wunschfunktion	
Shape	Filtercharakteristik des Tiefpasses: Windowed (FIR TP Filter mit einer einstellbaren Anzahl Koeffizienten unter Width) Critical Bessel Butterworth Linkwitz Riley	
Slope oder Width	Flankensteilheit des Filters in dB/Oktave oder Filterlänge für FIR-Filter in Anzahl der Taps	
Lower boundary		
Cut off (-6 dB)	Untere Grenzfrequenz der Wunschfunktion	
Shape	Filtercharakteristik des Hochpasses: Windowed (FIR TP Filter mit einer einstellbaren Anzahl Koeffizienten unter Width) Critical Bessel Butterworth Linkwitz Riley	
Slope oder Width	Flankensteilheit des Filters in dB/Oktave oder Filterlänge für FIR-Filter in Anzahl der Taps	
Freq. response	flat = außer dem obigen HP und TP keine weiteren Filter oder Frequenzgangmanipulationen user defined = EQ Menu (besser nicht verwenden, sondern `J-Filter` aus dem `Edit` Menu benutzen)	
Target Output	Dateiname für die Zielfunktion, Standard: XT.SPK	

Tabelle 40 Eingabefenster Target Response unter Crossover work im Menu Edit

10.4 J-Filter

Befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung.

10.5 Create prototype bandpass

In `Create prototyp bandpass` werden die Zielbandpässe konstruiert, die später der Lautsprecher des entsprechenden Weges zusammen mit dem Frequenzweichen- und Entzerrfilter darstellen soll. Neben der Eingabe der Trennfrequenzen wird auch hier eine Filtercharakteristik erwartet, die nicht der Frequenzweichensteilheit entspricht, sondern schon das akustische Verhalten des Lautsprechers mit beinhaltet. Soll z.B. ein Mitteltieftonsystem in einem geschlossenen Gehäuse, das unterhalb seiner Resonanzfrequenz mit 12 dB/Oktave (HP 2.Ordnung) abfällt, über die Frequenzweiche auf eine Gesamthochpaßfunktion 4.Ordnung mit 24 dB/Oktave abgestimmt werden, so ist hier bei *Lower Boundary Slope 24 dB/Oktave* einzustellen. Die Frequenzweiche erhält dann eine elektrische Filterfunktion mit 12 dB/Oktave, die sich zusammen mit dem Lautsprecher, der ein akustisches Filter mit 12 dB/Oktave darstellt, zu dem gewünschten Filter mit 24 dB/Oktave ergänzt.

Bitte beachten: Sehr steile Filterflanken können zu langen Laufzeiten im Übernahmebereich führen, die sich bei einer minimalphasigen Entzerrung in groben Laufzeitfehlern und bei linearphasiger Entzerrung in einer hohen Grundlaufzeit äußern können.

Parameter	Bedeutung	
Upper boundary		
Cut off	Obere Eckfrequenz des Bandpasses im gewählten Weg (SUB,LOW,MID)	
Shape	Filtercharakteristik des Tiefpasses: Windowed (FIR TP Filter mit einer einstellbaren Anzahl Koeffizienten unter Width) Critical Bessel Butterworth Linkwitz Riley	
Slope oder Width	Flankensteilheit des Filters in dB/Oktave oder Filterlänge für FIR-Filter in Anzahl der Taps	
Lower boundary		

Parameter	**Bedeutung**	
Cut off	Untere Eckfrequenz des Bandpasses im gewählten Weg (LOW,MID,HIGH)	
Shape	Filtercharakteristik des Hochpasses: Windowed (FIR TP Filter mit einer einstellbaren Anzahl Koeffizienten unter Width) Critical Bessel Butterworth Linkwitz Riley	
Slope oder Width	Flankensteilheit des Filters in dB/Oktave oder Filterlänge für FIR-Filter in Anzahl der Taps	
Level	Pegel für die einzelnen Wege (SUB,LOW,MID,HIGH) Hier wird nur das eingestellt, was wirklich später als Pegelunterschied in der Gesamtfunktion auftreten soll. D.h. keine Endstufenanpassung und auch keine Anpassung an unterschiedliche Empfindlichkeiten in den einzelnen Wegen !!!	✋
Target input	Dateiname der vorgegebene Wunschfunktion aus dem `Target response` Menu, Standard: XT.SPK	
Bandpass output	Dateiname für die hier konstruierten Bandpaßfunktionen, Standard: XBPROT.SPK	

Tabelle 41 Eingabefenster Create Prototyp Bandpass unter Crossover work im Menu Edit

10.6 Process band pass

Im `Process band pass` Menu werden die bis zu diesem Zeitpunkt noch als idealisiert dargestellten Bandpässe so bearbeitet, wie sie auf der eingestellten Hardware später ausgeführt werden können. Durch die beschränkte Anzahl Filterkoeffizienten können manche Filterfunktion nicht genau so erreicht werden, wie sie in der Vorgabe gewünscht wurden. Werden keine weiteren Einstellungen vorgenommen, so erzeugt `Process band pass` aus den Wunschfunktionen in der Datei XBPROT.SPK die zu realisierenden Funktionen und speichert diese in der neuen Datei XB.SPK ab. Grundsätzlich wird dabei die unter `General settings` eingestellte Anzahl an Koeffizienten für die Filterfunktion angenommen. Für die Hochpaßfilterfunktionen in den Wegen LOW, MID und HIGH kann die Filterlänge künstlich auf einen einstellbaren Prozentsatz reduziert werden. Diese Methode empfiehlt sich bei Brickwall Filter, die durch ihre große Flankensteilheit zu unmäßigen Laufzeiten führen.

Parameter	Bedeutung	
Lower slope	erlaubt die Reduzierung der effektiven Anzahl Koeffizienten nur für die Hochpaß-Filter in dem betreffenden Weg (Angabe in % bezogen auf die eingestellte Anzahl Koeffizienten), Standard: 100%	☜
Brickwall thres.	Grenzwert unterhalb dessen unabhängig von der gewählten Filterflanke die maximale Steilheit eingestellt wird. Wichtig für die Wege mit Downsampling, wo oberhalb der halben Abtastfrequenz eine möglichst hohe Sperrdämpfung vorliegen sollte. Standard: -40 dB	☜
Target input	Dateiname der vorgegebene Wunschfunktion aus dem `Target response` Menu, Standard: XT.SPK	
Bandpass input	Dateiname der vorgegebene Bandpass-Wunschfunktion aus dem `Create prototype band pass` Menu, Standard: XBPROT.SPK	
Bandpass output	Ergebnis des Process Bandpass Menu, das für die weitere Verarbeitung zu Grunde gelegt wird Standard: XB.SPK	

Tabelle 42 Eingabefenster Process Bandpass unter Crossover work im Menu Edit

10.7 Limiter settings

Im Menu `Limiter settings` können alle Einstellung für die Limiterfunktionen und die Eingabe der Endstufenparameter erfolgen. Die Limiterfunktionen sind nur für Hugo kompatible Geräte gültig. Der mit 2 ms Delay vorausschauend arbeitende Peaklimiter von Hugo garantiert eine absolute Einhaltung der Grenzwerte. Zur optimalen Ausnutzung der Peakleistung einer Endstufe kann ein größerer Surge Wert und eine zugehörige Zeitkonstante eingestellt werden.

Der Thermolimiter arbeitet mit einem einfachen thermischen Modell der Schwingspule mit zwei Zeitkonstanten. Die kurze Zeitkonstante berücksichtigt nur die Wärmekapazität der Schwingspule wogegen die längere Zeitkonstante auch die sehr große Wärmekapazität des Magneten und Lautsprecherkorbes einbezieht. Anschaulich bedeutet dieses, daß die Schwingspule eines mit konstanter Leistung betriebenen Lautsprechers sich zunächst recht schnell bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt, wo sich die Spule dann mit ihrer kalten Umgebung in einem thermischen Gleichgewicht befindet. Sehr viel langsamer erwärmt sich jetzt durch den ständigen Wärmefluß von der heißen Spule auch der Magnet. Mit zunehmender Magnettemperatur fällt der Temperaturgradient von der Spule zum Magneten, so daß sich die Spule auch weiter erwärmt.

In den Limiter Settings kann nur die kurze Zeitkonstante für die Spule eingestellt werden. Die lange Zeitkonstante errechnet sich über einen gemittelten Faktor aus der kurzen. Beide Angaben sind nicht ganz unkritisch und bedürfen einiger Tests vorab um die Richtigkeit zu prüfen.

Ein wichtiger Parameter ist das Endstufen Gain, da Hugo nicht über Sense-Inputs verfügt und sich darauf verlassen muß, daß die Endstufe genau die eingestellte Verstärkung hat.

Parameter	**Bedeutung**	
Impedance	nominelle Lautsprecherimpedanz 2,4,8,16 Ohm	
Amps		
Gain	Verstärkung der Endstufen in dB !!!	
Contin. output	Dauerleistung der Endstufe an der oben angegebenen Impedanz	
Surge	Absolute Peakleistung der Endstufe an der oben angegebenen Impedanz	

Parameter	Bedeutung	
Surge duration	Zeitkonstate für den Surge Wert	
Speaker		
Peak limit	Impulsbelastbarkeit des Lautsprechers	
Thermo limit	Dauerbelastbarkeit des Lautsprechers	
Time constant	Zeitkonstante für die Erwärmung des Lautsprechers	💣
Units	Die Einheit für die Eingabe der vorherigen Werte kann in Watt/Volt-RMS/Volt-Peak/dBu/dBV oder auch gemischt erfolgen. Die Umrechnung erfolgt automatisch. Die Leistungsangabe in Watt bezieht sich auf die oben eingetragene Nennimpedanz.	
Referred Output	Für alle Angaben unter Unit außer Watt kann hier gewählt werden, ob die Spannungswerte sich auf den Endstufenausgang (Amps) oder den Ausgang des Controllers (Hugo) beziehen.	
Set to full scale output	Alle Limiter auf Maximalwert stellen	
Lim Setup		
... Max DA DC-err.	---	✋
... Max DA level	Maximaler Ausgangspegel des Controllers in dBu Hugo Standard ist 16 dBu für den GAE DSC28 können Werte von 0,6,12 und 18 dBu im Gerät per Jumper gewählt werden	⌨
... Peak DA voltage	Maximale Ausgangsspannung des Controllers in V_s Hugo Standard ist 6,915 V_s	👓

Tabelle 43 Eingabefenster Limiter settings unter Crossover work im Menu Edit

10.8 FIR coef generation

Im Menu `FIR coef generation` werden die Koeffizienten für die FIR-Filter in ihrer endgültigen Form berechnet. Alle vorherigen Bearbeitungsschritte gehen hier über die *Bandpass input* Datei ein. Die Lautsprecherfrequenzgänge werden über die Messdateien der Lautsprecher unter *Speaker* eingebracht.

Parameter	**Bedeutung**	
Stereo setup	individuelle Entzerrung für den linken und rechten Kanal yes/**no**	
Single step	Einzelschrittmodus für Testzwecke yes/**no**	
Display text	Text mit max. 18 Zeichen der später im Display des Controllers angezeigt wird	
Gain adjust	Pegelanpassung für den kompletten Koeffizientensatz	
Optimize passes	Anzahl der Interationsschritte zur Optimierung der Filterfunktion bei gegebener Filterlänge Empfehlung: 1-3	
Filter ident	1	
Speaker	Dateinamen der Lautsprechermessungen	
Inv. Dynamic	Maximale Anhebung zur Kompensation der Lautsprecherfrequenzgänge, Empfehlung: 12 dB	
Delay	lin LS linearphasige Gesamtentzerrung lin FIR nur linearphasige Filter minimal minimalphasige Filter (kurze Grundlaufzeit)	
Process speaker ...	siehe Tabelle 45	
Self response	Dateiname einer Messdatei, die in CH0..3 die Frequenzgänge des Controllers ohne jegliche Filter beinhaltet. Vorher NEUTRAL.BLK in Hugo laden. CH0=SUB ; CH1=LOW ; CH2 = MID ; CH3=HIGH Dateiname: XC44.....SPK	
Target input	Dateiname der vorgegebene Wunschfunktion aus dem `Target response` Menu, Standard:	

Parameter	Bedeutung	
	XT.SPK	
Bandpass input	Dateiname der vorgegebene Bandpass-Funktion aus dem `process band pass` Menu, Standard: XB.SPK	
Coef output	Zieldatei, in der die Koeffizienten und Limitereinstellungen für den Hugo abgelegt werden. Diese wird später mit `Dispatch FIR set to Hugo` in den Hugo geladen bzw. in ein Eprom gebrannt.	
Create Diracs	Erzeugt eine Zieldatei ohne Filterfunktion. Dateiname: NEUTRAL.BLK Text: Through Die Limitereinstellungen bleiben gültig.	

Tabelle 44 Eingabefenster FIR coef generation unter Crossover work im Menu Edit

Das Fenster `Process speaker` erlaubt eine Vorverarbeitung der gemessenen Lautsprecherfrequenzgänge, bevor die Filter zur Systementzerrung und für Frequenzweiche berechnet werden. Nicht immer ist es sinnvoll, jeden Einbruch oder jede Überhöhung im Lautsprecherfrequenzgang durch das Filter zu kompensieren, auch wenn die Möglichkeiten durch die hohe Auflösung der FIR-Filter im Hugo dazu vorhanden wären. Im `Process speaker` Menu können die Frequenzgangmessungen der Lautsprecher daher vorab mit der smooth Einstellung in bekannter Form geglättet werden. Eine zweite Bearbeitungsmöglichkeit ist *Cmp&squeeze*, wo dir Originalmessung mit einer geglätteten Kurve mit einstellbarer Glättungsbreite verglichen wird. Alle Anteile die unterhalb der geglätteten Kurve liegen werden mit dem Faktor *Below smoothed* und die oberhalb liegen mit dem Faktor *Above smoothed* gewichtet. Der Faktor 1 bewirkt keine Veränderung. Durch diese Einstellungen wird es möglich, Überhöhungen in einem Lautsprecherfrequenzgang vollständig zu kompensieren und Einbrüche nicht oder nur geringfügig bei der Kompensation zu beachten. In speziellen Fällen, wenn ein scharfer Einbruch z.B. durch Partialschwingungen der Membran verursacht wird, darf dieser keinesfalls durch eine vorherige Pegelanhebung bei dieser Frequenz im Controller ausgeglichen werden. Es empfiehlt sich eine Einstellung bei Cmp&squeeze mit *Width=1/3 oct.* und *Above=1,0* sowie *Below=0,3* . Die meßtechnischen Ergebnisse sehen danach weniger perfekt aus, da die Einbrüche im Frequenzgang noch zu erkennen sind.

Klanglich ist diese Einstellung gegenüber einer vollständigen Entzerrung aber zu bevorzugen.

Parameter	Bedeutung	
Smooth	Vorab Glätten y/n	
Width 1/Oct.	Bandbreite der Glättung (Empfehlung: 1/6 Oct.)	
Smoothing of	Glättung von Betrag, Laufzeit oder beides	
Cmp & squeeze	Vergleicht mit einer geglätteten Kurve und komprimiert Einbrüche und Überhöhungen mit unterschiedlichen Faktoren y/n	
Width 1/Oct.	Bandbreite der Glättung für die Vergleichskurve (Empfehlung: 1/3 Oct.)	
Above smoothed	Kompressionfaktor für Überhöhungen (Empfehlung: 1,0)	
Below smoothed	Kompressionfaktor für Einbrüche (Empfehlung: 0,3)	

Tabelle 45 Eingabefenster Process speaker für eine Vorverarbeitung der Lautsprecher Messdateien.

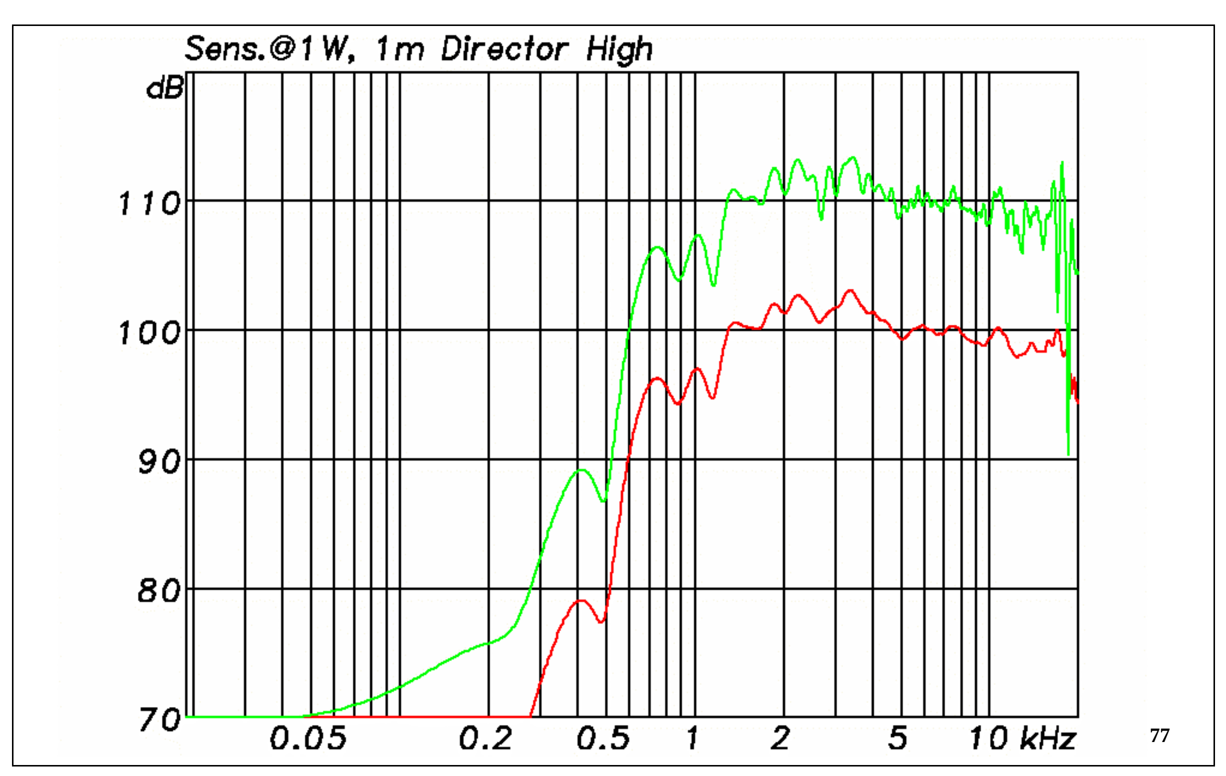


Abbildung 97 Lautsprechermessung mit/ohne Glättung
Parameter in Process speaker: smooth=yes
1/6 Oct. smoothing of magnitude

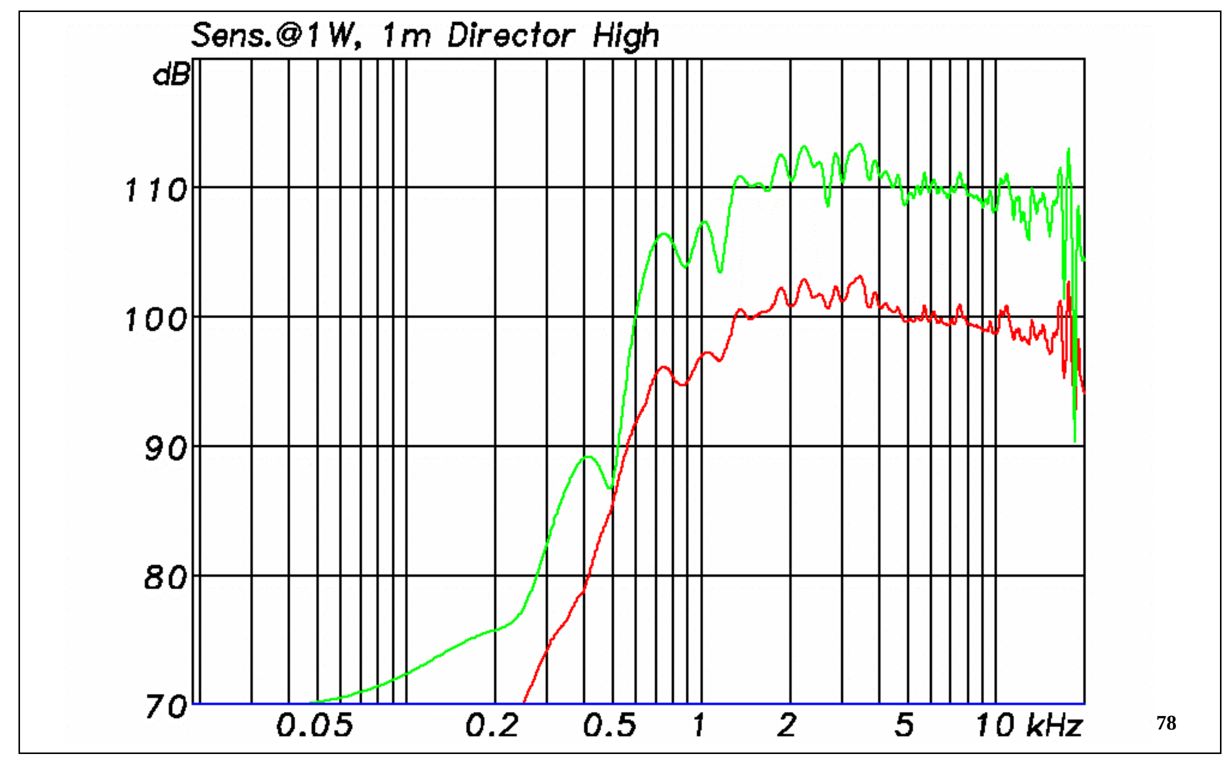


Abbildung 98 Lautsprechermessung mit/ohne Cmp & squeeze
Parameter in Process speaker: Cmp&squeeze=yes
1/1 Oct. Width, Above smoothed: 1,0 Belowe smoothed: 0,3

10.9 Dispatch FIR set to Hugo

Mit `Disptach FIR set to Hugo` können Koeffizienten Dateien mit Filter- und Limiterdaten einfach und schnell über die serielle Schnittstelle vom PC in den Hugo geladen werden. Die Auswahl und Einstellungen der seriellen Schnittstelle erfolgt im Menupunkt `Hugo Remote` unter *RS232 config*.

Parameter	Bedeutung	
Path	aktueller Pfad	
Mash	Dateimaske (für Koeffizienten Files hier *.BLK)	
Name	Dateiname	
Load	Datei laden	
Mode	append = neue Datei im Hugo Speicher an die vorherige anhängen overwrite = vorherige Datei im Hugo Speicher mit der neuen Datei überschreiben	
Rename	Dateiname ändern	
Delete	Datei löschen	
Make Dir	Neues Verzeichnis anlegen	
Filter	Filtername der ausgewählten Koeffizientendatei	👓
Mode	stereo oder mono Mode der ausgewählten Koeffizientendatei	👓
Coefs	Anzahl der Filtertaps in den einzelnen Wegen der ausgewählten Koeffizientendatei	👓
Extract coefficients	Schreibt die Filterfunktionen der einzelnen Wege als Impulsantworten in getrennte Dateien mit den Endungen *.DAT, die als Zeitsignal wieder eingelesen werden können.	
Remaining	freier Speicherplatz auf dem aktuellen Laufwerk	
Exit MF	MF verlassen	
DOS command	Wechsel auf die DOS Ebene	

Parameter	Bedeutung	
Sort	Sortierkriterium für die Dateiliste Name/Datum/Größe ; aufwärts/abwärts	

Tabelle 46 Eingabefenster Dispatch FIR set to Hugo unter Crossover work im Menu Edit

10.10 Hugo Remote

`Hugo Remote` erlaubt die Fernsteuerung der meisten Funktion aus dem Main Menu im Hugo vom PC aus. Die EQ Funktionen können von hier noch nicht bedient werden.

Dieses Kapitel befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung ist nicht mehr auf dem aktuellen Stand.

Parameter	Bedeutung	
Midi channel	Midikanal: 0	
Command	7	
Parameter No.	0	
Parameter val.	0	
RS 232 config ...	Auswahl der seriellen Schnittstelle COM 1,2,... Protokol der Schnittstelle: 9600/8/1/None/no	
Input	analoger oder digitaler Eingang bzw. analoger Eingang und digitales Insert	
Filter (del)	Auswahl Filtersatz Filtersatz löschen mit del	
Vol ±	Volume Einstellung	
Balance	Balance Einstellung	
Output	Auswahl des Ausgangskanales 0=SUB links 4=SUB rechts 1=LOW links 5=LOW rechts 2=MID links 6=MID rechts 3=HIGH links 7=HIGH rechts	
Phase invert	Ausgang phaseninvertieren	
Mute (all)	Ausgang muten oder wieder aktivieren all mutet alle Ausgänge	

Tabelle 47 Eingabefenster Hugo Remote unter Crossover work im Menu Edit

11 Hugo

Dieses Kapitel befindet sich zur Zeit noch in Bearbeitung ist nicht mehr ganz auf dem aktuellen Stand.

11.1 Tastenfeld

Setup Menu F1	**Main Menu F2**	**EQ Menu F3**	↑ Auswahl der Bedienebene in einem Menu
Shift	← In einer Bedienebene nach links	→ In einer Bedienebene nach rechts	↓ Auswahl der Bedienebene in einem Menu

Tabelle 48 Hugo Tastenfeld (ITA Version 2. Generation)

Die Parametereinstellung erfolgt über den Drehknopf. Für große Schritte ist der Knopf zusätzlich gedrückt zu halten. Für kleinere Schritte ist die Shift-Taste zusätzlich zu drücken. Alle Eingaben sind nach der Auswahl mit Enter durch Druck auf den Drehknopf zu bestätigen.

11.2 Setup Menu

No.	Text	Bedeutung	Verwendung
1.	Select Projekt	Hugo, Kunstkopfentzerrer, ...	☹
2.	Brightness Display ; LEDs	Helligkeit Led Anzeigen und Display	☺
3.	Midi-Settings Channel ; Out	Midi Setup mit Kanalauswahl (1-16) Output als Out, Through oder Loop	☺
4.	AES-Stat. Samplerate	Aktuelle Samplerate	👓
5.	AD-Settings Clock ; Intern AD	AD Modus: 2 gestackte AD-Umsetzer oder 4 nicht gestackte AD-Umsetzer	💣
6.	DSP-Routing	Interne Kreuzschiene	💣
7.	DSP-Tools	nur für Serviceaufgaben	💻
8.	DSP-Prog. Select DSP0...5	Aufgabe der einzelnen DSPs im Hugo	💣
9.	P-Heap	nur für Serviceaufgaben	💻
10.	Versions-Nr.	Reset und Versionsnummer der Software	👓

Tabelle 49 Hugo Setup Menu

11.3 Main Menu

No.	Text	Bedeutung	Verwendung
1.	Select	nur für Service	💻
2.	Volume ; Balance	Master Volume 20 dB = 0 dB Gain ohne Filter mit Diracs (NEUTRAL.BLK) Max.Output - Max.Input 16-27 dBu Max. FIR Gain -3 dB EQ-Volume -6 dB Summe = -20 dB Von diesem Wert ist noch die maximale Anhebung in den Filtern zu subtrahieren (z.B. 12 dB)	☺
3.	Mute Left	Mute Ausgang CH1..4 links	☺
4.	Mute Right	Mute Ausgang CH1..4 rechts	☺
5.	Input Select	nur Analog, nur Digital oder Analog + Digital Insert	☺
6.	Filter Select	Auswahl Filtersatz für X-Over und System EQ mit FIR-Filtern	☺
7.	Master Delay	Main Delay ohne Processdelay vom DSP-System und den Filtern	☺
8.	Limiter Release Threshold	Limiter Release Zeitkonstante Threshold kleiner gegenüber den im Setup eingestellten Werten	☺
9.	Gain CH1 CH2 CH3 CH4	Gain für die einzelnen Ausgänge links und rechts gekoppelt	☺
10.	Delay Left	Delay für die einzelnen Ausgänge	☺

No.	Text	Bedeutung	Verwendung
		links	
11.	Delay Right	Delay für die einzelnen Ausgänge rechts	☺
12.	Phase Inv. Left	Phase Inverse für die einzelnen Ausgänge links	☺
13.	Phase Inv. Right	Phase Inverse für die einzelnen Ausgänge rechts	☺
14.	Level Meter	Aussteuerungsanzeigen Ein oder Aus	☺

Tabelle 50 Hugo Main Menu

11.4 EQ Menu

No.	Text	Bedeutung	Verwendung
1.	EQ Select 0...16	Speichern der EQ-Settings	☺ ⌨
2.	EQ Volume ; EQ On/Off	Volume -24..0 dB (Default -6 dB)	
3.	EQ-Noise Shaper Select		
4.	EQ Filter 1	Type/Q/Hz/dB	☺
5.	.....		☺
6.	EQ Filter 14		☺

Getrennte Einstellungen für links und rechts									
No.	Type	Q	Hz	dB	No.	Type	Q	Hz	dB
Ch L					Ch R				

Tabelle 51 Hugo EQ Menu (optional)

Die insgesamt 28 parametrischen EQ sind zu je 14 auf den linken und rechten Eingang verteilt. In der Einstellung Link sind der linke und rechte Kanal gekoppelt. Werden die Kanäle einzeln bearbeitet und dann in den Link Modus geschaltet, so übertragen sich die Einstellungen vom zuletzt aktiven Kanal auf den anderen.

Der Filtertyp (LP/HP/PEQ/LS/HS) wird erst nach dem Druck der Enter-Taste aktiviert. Wird bei der Parametereinstellung gleichzeitig die Shift-Taste gedrückt, so wird die Schrittweite auf die kleinste, d.h. feinste Einstellung, gesetzt. In Kombination mit der Enterfunktion, über den gedruckten Drehregler, wird die Schrittweite für eine Schnellverstellung vergrößert.

Einstellungen für links und rechts gekoppelt									
No.	Type	Q	Hz	dB	-----	-----	-----	-----	-----
Link					-----	-----	-----	-----	-----

Tabelle 52 Hugo EQ Menu (optional)

Type: Low Pass, High Pass, Peak, Lowshelving 6 und 12 dB, Highshelving 6 und 12 dB

Q: Filtergüte

Hz: Filterfrequenz

dB: Filter Gain in dB

11.5 Die Fernbedienung

11.6 Ein- und Ausgänge

Input:
- gestackter AD-Umsetzer (je 20 Bit)
- Vollaussteuerung bei +27 dBu @ 1kHz
- S/N 127 dB

Output:
- 20 Bit DA-Umsetzer (BB PCM1702)
- 4-/8-fach Oversamplingfilter
- maximaler Ausgangspegel +16 dBu
- für GAE DSC28 0,6,12 oder 18 dBu intern über Jumper auszuwählen
- S/N 114 dB

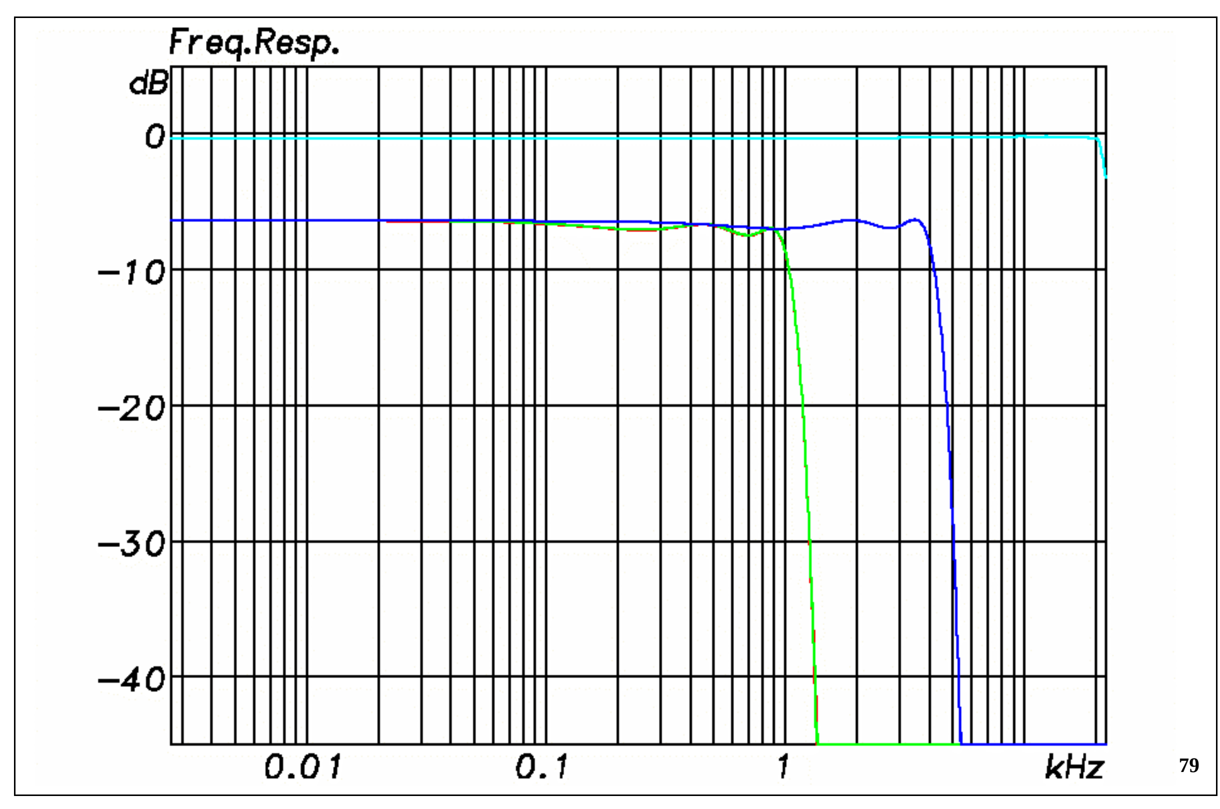


Abbildung 99 Frequenzgänge von Hugo SUB,LOW,MID und HIGH ohne Filter (Volume = +22 dB)

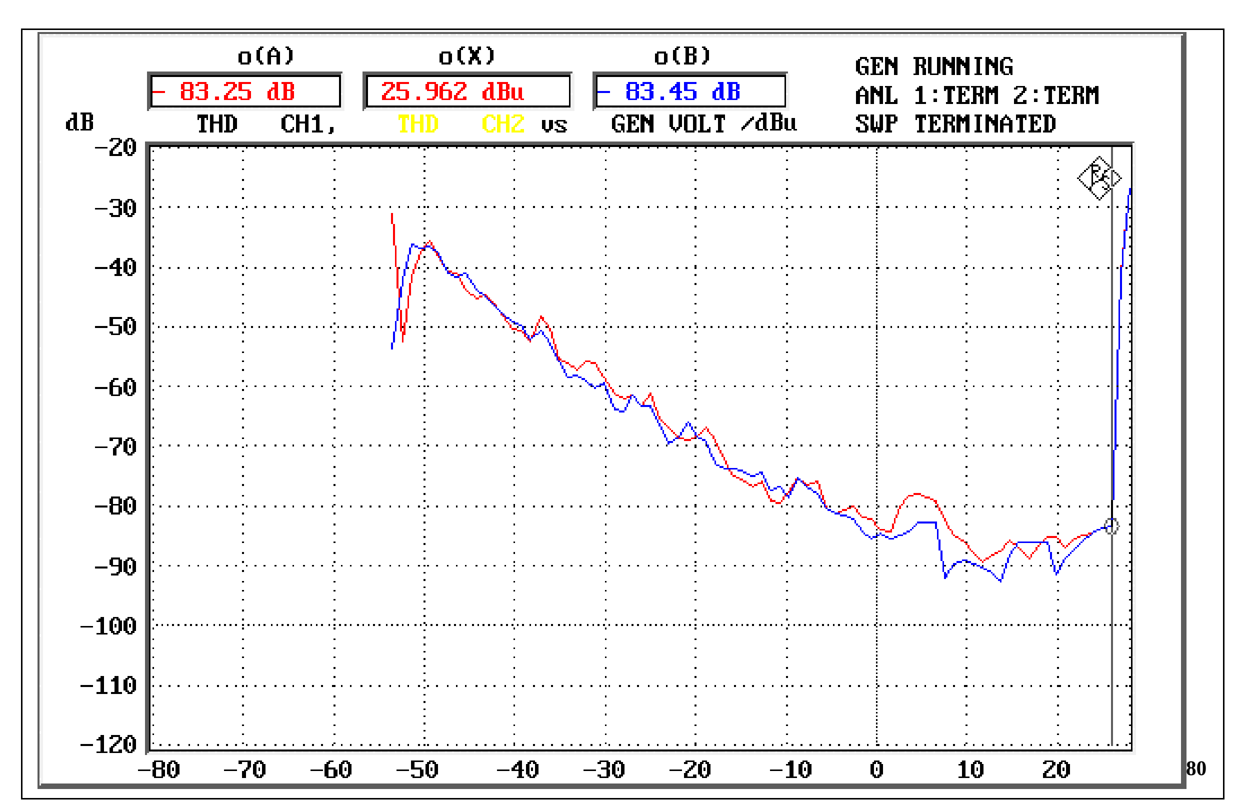


Abbildung 100 THD bei 1 kHz ; Analog Input ; Ausgang HIGH

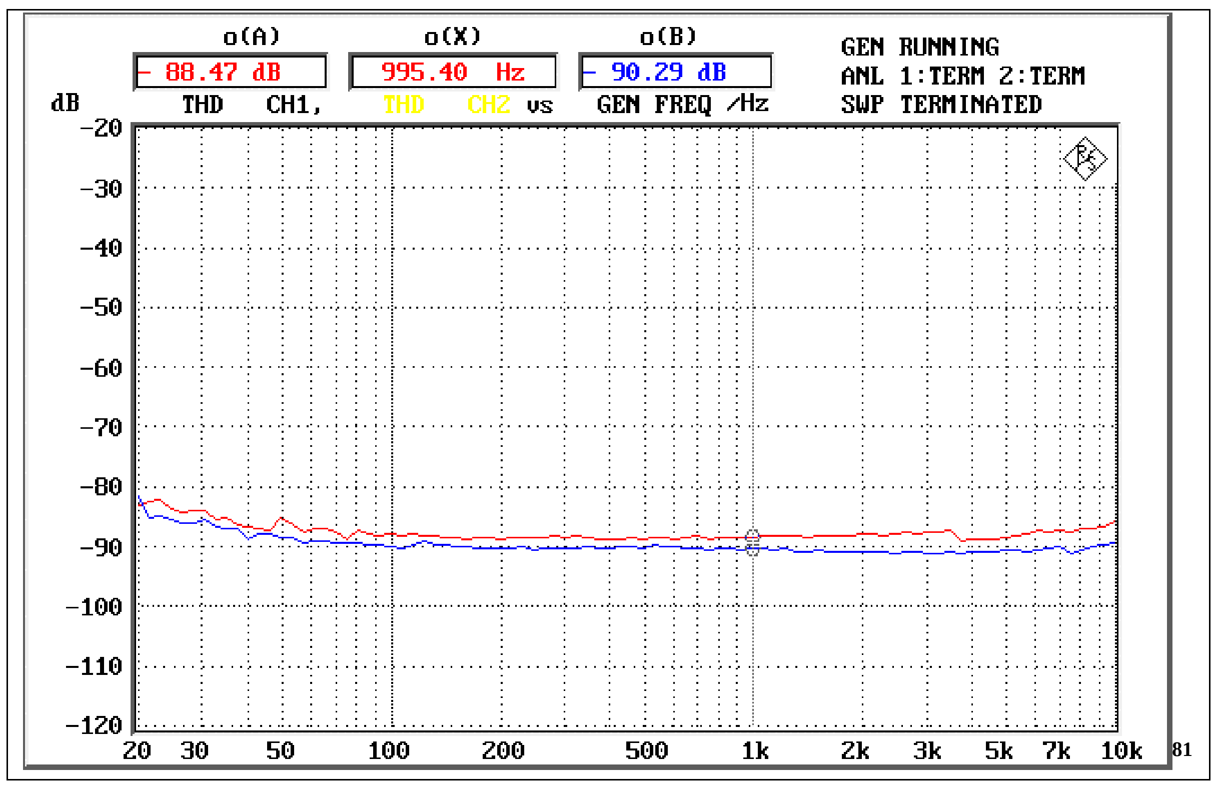


Abbildung 101 THD über der Frequenz bei +10 dBu Eingangspegel Analog Input ; Ausgang HIGH

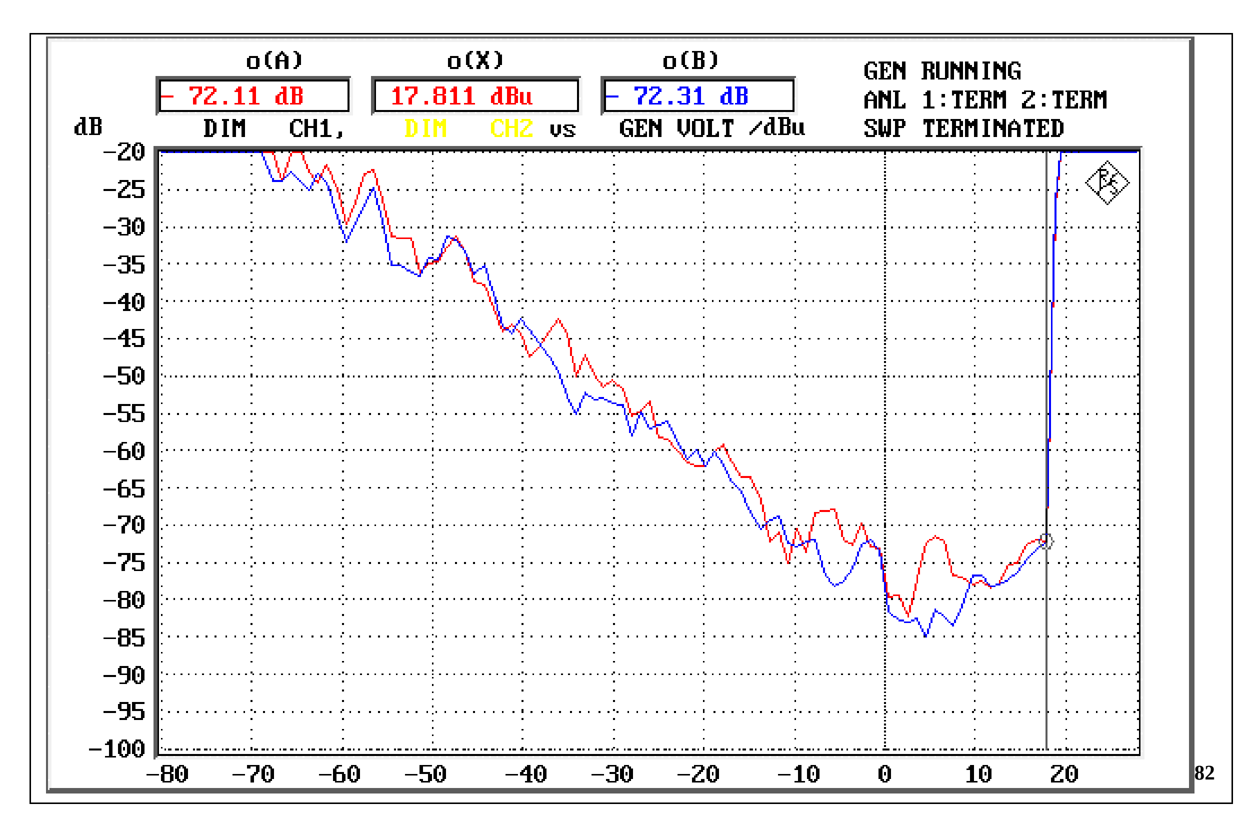


Abbildung 102 DIM100 ; Analog Input ; Ausgang HIGH

12 Verzeichnisse

12.1 Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen als PCX-Grafiken im 150x150 dpi Format mit 16-Farben in der ZIP-Datei MFA-PCX.ZIP.

12.2 Tabellenverzeichnis

12.3 Softwareverzeichnis

Zum Meßsystem gehörige Software.

Dateiname	Dateityp	Funktion	Datum
EXEFILES			
MF	EXE	Monkey Forest ohne Hugo Option (Standard)	20.4.99
MFX	EXE	Monkey Forest mit Hugo Option	20.4.99
MAXILS	EXE	Maxils erstellt Zerfallsspektren und kann GDF Daten grafisch darstellen	13.2.99
PRINTGL	EXE	DOS Shareware Programm zur Konvertierung von HPGL Grafiken auf PCX Format	30.12.92
PLOT-VGA	BAT	Batchfile zur Darstellung von HPGL Dateien auf dem Bildschirm (basierend auf Printgl)	11.11.98
PLOT-PCX	BAT	Batchfile zur Konvertierung von HPGL Dateien in PCX Grafiken mit 150x150 dpi (basierend auf Printgl)	3.11.98
UNIVESA	EXE	Grafiktreiber der für einige ältere Grafikkarten evtl. erforderlich sein kann	14.2.98
POLMAKRO	XLS	Excel 5.0 Makro für Polardiagramme und Isobaren in 2D- bzw. 3D-Darstellung (nur für Excel 5.0 zu verwenden !!)	14.2.99
EGAVGA	BGI	Grafiktreiber für Maxils	4.5.90
VGA16	BGI	Grafiktreiber für Maxils	20.8.90
SANS	CHR	Zeichensatz für HPGL Grafiken aus MF	31.3.92
MAXIDAT			
ERDNUß9	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS	15.10.94

		mit 2^9-1 Werten	
ERDNUß10	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{10}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß11	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{11}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß12	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{12}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß13	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{13}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß14	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{14}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß15	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{15}-1 Werten	15.10.94
ERDNUß16	DAT	Anregungssignal: gewichtete MLS mit 2^{16}-1 Werten	15.10.94
PINK-NOI	DAT	Pinknoise mit 2^{14} Werten	18.5.99
PINK-SWE	DAT	Pinksweep mit 2^{14} Werten	8.6.99
DOKU			
PRINTGL	DOC	Erläuterung zum Printgl	30.12.92
MFA-V31D	DOC	Anleitung zu MF in Deutsch in Form einer Word 97 Datei mit allen Grafiken	16.6.99
MFA-V31D	PDF	Anleitung zu MF in Deutsch in Form einer Acrobat PDF Datei mit allen Grafiken	16.6.99
MFA-V31E	DOC	Anleitung zu MF in Englisch in Form einer Word 97 Datei mit allen Grafiken	7.6.99
MFA-V31E	PDF	Anleitung zu MF in Englisch in Form einer	14.6.99

		Acrobat PDF Datei mit allen Grafiken	
MFA-PCX	ZIP	Alle Grafiken aus der Anleitung in einzelnen PCX Dateien mit 150 dpi Auflösung	16.6.99
FILTER			
EXAMPLE			

Tabelle 53 Inhalt der CD Monkey Forest mit Stand vom 16.6.99.

Abweichend von der unter 2.1 beschriebenen Software Installation von einer Diskette, sollte bei Verwendung dieser CD die komplette Verzeichnisstruktur von der CD einfach übernommen werden. Der Pfad EXEFILES wäre dann anschließend noch in der PATH Anweisung der AUTOEXEC.BAT Datei einzutragen. Für eigene Messungen sollte eine unabhängige eigene Verzeichnisstruktur aufgebaut werden, so daß immer eine klare Trennung zu den Meßsystemdateien möglich ist, was Updates erheblich vereinfacht.

Unter Example finden sich eine Reihe verschiedener Beispielmessungen. Für die EAW KF750 Lautsprecher ist hier ein kompletter Datensatz mit allen Messungen incl. Polardaten im Verzeichnis EAWKF750 zu finden. Unter Polar sind einige Beispielmessungen für das räumliche Abstrahlverhalten mit horizontalen und vertikalen Isobarenkurven und eine komplette GDF Datei abgelegt. Das Verzeichnis Micro enthält zwei typische Mikrophon Kompensationsdateien einer Sennheiser und einer Monacor Kapsel.

Unter PCK Files finden sich die Pickfiles zu den Beispielen aus Kap. 8 dieser Anleitung.

Alle Beispiele werden ständig aktualisiert und erweitert, so daß hier keine komplette Übersicht aufgeführt wird.

12.4 Literaturverzeichnis

Zur Zeit noch in Bearbeitung.

12.5 Stichwortverzeichnis

Zur Zeit noch in Bearbeitung.

Verzeichnis der verwendeten Grafikdateien.

---

[1] ABB: ROBBO.TIF
[2] ABB: PEGEL-1.PCX
[3] ABB: PEGEL-2.PCX
[4] ABB: ERDNUSS.PCX
[5] ABB: M57-FRE.PCX UND M57-ZER.PCX
[6] ABB: M57-PHA.PCX UND M57-LAU.PCX
[7] ABB: ALLE-IMA.PCX UND ALLE-SPA.PCX
[8] ABB: ALLE-FRE.PCX UND ALLE-PHA.PCX
[9] ABB: LSR-MAX.PCX UND LSR-95DB.PCX
[10] ABB: ISO-HOR.PCX UND ISO-VER.PCX
[11] ABB: DIR-FRDI.PCX UND DIFF-EQ.PCX
[12] ABB: COMP14.PCX
[13] ABB: EQ-FRE.PCX
[14] ABB: EQ-PHA1.PCX
[15] ABB: EQ-IMP.PCX
[16] ABB: EQ-PHA2.PCX
[17] ABB: LSCO14.PCX UND SEN-MIC.PCX
[18] ABB: LSCO14F.PCX
[19] ABB: CC82-1M.PCX
[20] ABB: CC82-IMP.PCX
[21] ABB: CC82IMPF.PCX
[22] ABB: CC82-WIN.PCX
[23] ABB: CC82-NM.PCX
[24] ABB: CC82-NT.PCX
[25] ABB: CC82-NAH.PCX
[26] ABB: CC82WINA.PCX
[27] ABB: CC82-KMB.PCX
[28] ABB: ALLE-FRE.PCX
[29] ABB: ALLE-PHA.PCX
[30] ABB: ALLE-IMA.PCX
[31] ABB: ALLE-SPA.PCX
[32] ABB: HT-FRE1.PCX UND HT-IMP1.PCX
[33] ABB: HT-FRE2.PCX UND HT-IMP2.PCX
[34] ABB: HT-FRE3.PCX UND HT-IMP3.PCX
[35] ABB: HT-FRE4.PCX UND HT-IMP4.PCX
[36] ABB: TOP-IMP.PCX UND TOP-FRE.PCX
[37] ABB: TOP-MAXI.PCX UND TOP-ZER.PCX
[38] ABB: TOP-IMPW.PCX
[39] ABB: POLAR-1K.PCX
[40] ABB: DIR-HORI.PCX
[41] ABB: DIR-HORD.PCX
[42] ABB: KS-UNF.PCX
[43] ABB: THD-80HZ.PCX
[44] ABB: LSR-95DB.PCX
[45] ABB: LSR-MAX.PCX
[46] ABB: IMPCO15.PCX
[47] ABB: CC82IMPE.PCX
[48] ABB: PHL-TSP.PCX
[49] ABB: EQ-NOIS.PCX UND EQ-NOISA.PCX
[50] ABB: A-KURVE.PCX UND AI-KURVE.PCX
[51] ABB: EQ-THD20.PCX   EQ-THD21.PCX
[52] ABB: IMP-RAUM.PCX
[53] ABB: RUEF.PCX
[54] ABB: IMP-POW.PCX
[55] ABB: IMP-INT.PCX

56 ABB: TERZFILT.PCX
57 ABB: OCTAFILT.PCX
58 ABB: IMP-OCTA.PCX
59 ABB: FRE-OCTA.PCX
60 ABB: ETC.PCX
61 ABB: ETC-S125.PCX BIS ETC-8K.PCX UND ETC-SA.PCX
62 ABB: IMP-RAUM.PCX
63 ABB: IMP-OCTA.PCX
64 ABB: IMP-SQRE.PCX
65 ABB: MTF-KOMP.PCX
66 ABB: MTF-REDU.PCX
67 ABB: PINK-0DB.PCX
68 ABB: PINK80DB.PCX UND C-KURVE.PCX
69 ABB: KINOMESS.PCX
70 ABB: 2X PINK-SPK.PCX
71 ABB: PINK-LAN.PCX UND PINK-LAS.PCX
72 ABB: PINK-NOI.PCX UND PINK-SWP.PCX
73 ABB: ROBO-FRE.PCX
74 ABB: ROBNOISE.PCX
75 ABB: ROBO-THD.PCX
76 ABB: XT.PCX
77 ABB: SMOOTHED.PCX
78 ABB: COMPSQEU.PCX
79 ABB: XC44.PCX
80 ABB: HUGOTHDL.PCX
81 ABB: HUGOTHDF.PCX
82 ABB: HUGODIML.PCX